

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

TINA TOMINIĆ

**VARIJABILNOST MORFOLOGIJE I VOLUMENA ŽALA DUGI RAT
TEMELJENA NA SfM FOTOGRAFIJI**

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistra geologije

Zagreb, 2017.

Ovaj diplomski rad izrađen je na Geološkom odsjeku pod vodstvom prof.dr.sc. Mladena Juračića u sklopu diplomskog studija Geologija zaštite okoliša, na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru, prof.dr.sc. Mladenu Juračiću na razumijevanju, strpljenju te danim komentarima i savjetima tijekom procesa izrade ovog diplomskog rada.

Neizmjereno i veliko hvala dr.sc. Kristini Pikelj koja mi je od prvih održanih vježbi iz kolegija Geologija mora usadila interes prema istraživanju i interpretaciji morskih i obalnih okoliša. Hvala joj za pomoć pri odabiru teme i nalaženju potrebne literature, prijenos znanja i davanje savjeta na terenima, ustupanje potrebne opreme i podučavanje specijaliziranim računalnim programima. Hvala joj od srca na velikoj dozi strpljenja, razumijevanja i stalnoj dostupnosti za moje mnogobrojne upite.

Hvala gosp. Robertu Koščalu na izrađenoj litološkoj i političkoj karti istočne Jadranske obale i karti uzorkovanja, posebno za potrebu ovog diplomskog rada.

Hvala gosp. Branku Kordiću na ustupljenim geodetskim uslugama mjerenja kontrolnih točaka na žalu Dugi Rat.

Hvala gosp. Mladenu Banoviću na ustupanju slika i danim informacijama o Dugom Ratu i Stipi Muslimu za pomoć pri slikanju.

Hvala mojim kolegama za sve godine zajedničkog usvajanja znanja, nezaboravne terene i druženja.

Hvala mojim prijateljima za sve dane ohrabrivanja i podrške te dijeljenje sa mnom svih dobrih i onih manje dobrih trenutaka tijekom cijelog studija.

Veliko hvala sestri Larisi, mojem motivatoru i životnom učitelju, koja me pratila svojom podrškom te vjerovala u mene, od mojih prvih školskih dana do završetka studija.

I na kraju, najveće hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje, podržavali me i pružali mi veliku potporu te tako pridonijeli mom uspjehu u prelasku još jednog životnog koraka.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geološki odsjek

Diplomski rad

VARIJABILNOST MORFOLOGIJE I VOLUMENA ŽALA DUGI RAT TEMELJENA NA SfM FOTOGRAMETRIJI

TINA TOMINIĆ

Rad je izrađen: Geološki odsjek, Geološko-paleontološki zavod, Horvatovac 102a, Zagreb

Sažetak:

Hrvatska obala je podložna intenzivnim promjenama uzrokovanim prihranjivanjem prirodnih ili gradnjom umjetnih žala, prvenstveno u turističke svrhe. Žalo Dugi Rat jedan je primjer umjetnog žala na kojem se radi kontinuirane erozije odvija redovito prihranjivanje. Metoda SfM fotogrametrija upotrijebljena je za izradu digitalnih elevacijskih modela (DEM-ova) radi utvrđivanja morfoloških promjena i promjena volumena sedimenta na žalu tijekom dvogodišnjeg perioda. Granulometrijskom metodom analizirane su veličina i oblik zrna na 7 reprezentativnih uzoraka sakupljenih iznad intertajdala duž žala. Rezultati su pokazali da je srednja veličina zrna manja od veličine zrna sedimenta prirodnih žala u okolici. DEM-ovi razlike pokazuju da je nasipani materijal na žalu neprikladan s obzirom na veličinu zrna, a glavni čimbenik koji utječe na promjene volumena sedimenta i morfologije žala su valovi juga. SfM metoda pokazala se upotrebljivom za praćenje kratkotrajnih promjena na malim žalima kakvim obiluje hrvatska obala, kao i činjenicu da je potrebno razviti strategiju održivog upravljanja žalima, unutar upravljanja obalnom zonom.

Ključne riječi: digitalni elevacijski model, granulometrijska analiza, SfM fotogrametrija, žalo

Rad sadrži: VII+55 stranica, 45 slika, 2 tablice, 62 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica Geološkog odsjeka PMF-a, Horvatovac 102a, 10000 Zagreb

Mentor: prof. dr. sc. Mladen Juračić

Ocjenjivači: prof. dr. sc. Mladen Juračić, izv. prof. dr. sc. Marijan Kovačić, v. pred. dr. sc. Borna Lužar-Oberiter

Rad prihvaćen: 10.02.2017.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Master Thesis

MORPHOLOGY AND VOLUME VARIABILITY OF DUGI RAT BEACH BASED ON SfM PHOTOGRAMMETRY

TINA TOMINIĆ

Thesis completed in: Department of Geology, Division of Geology and Paleontology,
Horvatovac 102a, Zagreb

Abstract:

Croatian coast is affected by intensive changes caused by replenishment of natural beaches or the tendency to build artificial ones, primarily for tourism purposes. One example of a replenished artificial beach where continuous erosion is regularly present is Dugi Rat beach. SfM photogrammetry was applied to generate digital elevation models in order to determine the morphologic changes and sediment volume on the beach during a two-year period. In order to determine suitability of the sediment used for replenishment, grain size and shape were analysed on seven representative samples collected in the intertidal along the beach. Results show that the median diameter of sediment grains is less than the median of the adjacent natural beaches. According to DEMs of difference it can be concluded that the replenished material on the beach is not suitable with regards to grain size, while volume change and beach morphology are mostly caused by Sirocco waves. The SfM method has shown that it can be successfully applied for frequent beach surveys on the small beaches which dominate on the Croatian coast, as well as demonstrated the fact that it is necessary to develop a strategy for sustainable beach management within the coastal zone management.

Keywords: beach, digital elevation model, granulometric analysis, SfM photogrammetry

Thesis contains: VII+55 pages, 45 figures, 2 tables, 62 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Geological Library, Horvatovac 102a, 10000 Zagreb

Supervisor: PhD Mladen Juračić, Full Professor

Reviewers: PhD Mladen Juračić, Full Professor, PhD Marijan Kovačić, Associate Professor,
PhD Borna Lužar-Oberiter, Senior lecturer

Thesis accepted: February 10th 2017

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KRATKI PREGLED METODA U ISTRAŽIVANJU ŽALA.....	3
2.1. <i>In situ</i> metode praćenja i mjerenja geomorfoloških promjena na žalima.....	3
2.1.1. Mjerenje profila	3
2.1.1.1. Emeryjeva metoda	4
2.1.1.2. GPS profiliranje	5
2.2. Daljinske metode praćenja i mjerenja geomorfoloških promjena na žalima.....	6
2.2.1. Aerofotografija	6
2.2.2. Video snimanje.....	7
2.2.3. Laserski skeneri.....	8
2.2.4. Fotogrametrija	10
3. GEOLOŠKE, GEOMORFOLOŠKE I GEOGRAFSKE KARAKTERISTIKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	12
3.1. Geološki razvoj područja istočne obale Jadranskog mora.....	12
3.2. Geološke i geomorfološke karakteristike područja Dugi Rat.....	13
3.3. Geografske značajke Dugog Rata.....	15
3.3.1. Žalo Dugi Rat	16
4. MATERIJALI I METODE.....	18
4.1. SfM fotogrametrija	18
4.1.1. Terenski rad	19
4.1.2. Protokol generiranja digitalnog elevacijskog modela u Agisoft PhotoScanu	21
4.1.3. Surfer Software.....	23
4.2. Laboratorijske metode	24
4.2.1. Izravno mjerenje pomičnim mjerilom	24
4.2.2. Suho sijanje	26
4.2.3. Kombinirana granulometrijska analiza suhim sijanjem i izravnim mjerenjem..	27

5. REZULTATI	28
5.1. Razlike u morfologiji i volumenu žala	28
5.2. Granulometrijska analiza	35
6. RASPRAVA	43
6.1. Razlike u morfologiji i volumenu žala	43
6.2. Granulometrijska analiza	45
7. ZAKLJUČAK.....	48
8. LITERATURA	49

1. UVOD

Obalni je okoliš vrlo dinamičan te je danas jedan od najpromjenjivijih okoliša na Zemlji. Promjene na obalama prirodan su proces intenziviran utjecajem čovjeka. Praćenje i istraživanje obala prije svega važno je zbog mogućnosti njene zaštite od djelovanja prirodnih obalnih procesa, ali i antropogenog utjecaja. Istraživanjem veze između obalnih područja i obalnih procesa uzrokovanih raznim čimbenicima (klimatološkim, geofizičkim, oceanografskim itd.) bavi se između ostalog i geomorfologija obala (Hsu, 2005).

Generalno, obalni procesi uključuju prijenos energije i materijala iz jednog dijela obalnog okoliša u drugi erozijom sedimenta, njegovog transporta i taloženja. Erozijska obala je postala kritična točka u upravljanju obalama u mnogim zemljama. Intenzitet erozije obala ovisi o stijenskom sastavu obale, energiji valova, morfologiji žala (ako su prisutna na nekoj obali), smjeru vjetrova i njima generiranim valovima u odnosu na obalu te njihovoj jačini, zatim veličini zrna sedimenta, rasponu morskih mijena i općenito trajanju perioda prijenosa značajnih količina energije na kopno (Anthony, 2005).

Žalo je dio obalnog okoliša koji se definira kao nakupina pijeska, šljunka ili njihove kombinacije koje prema procjenama prekrivaju 30% svjetskih obala (Bird, 1996). Budući da su sedimenti žala nekohezivni oni su tzv. "međuspremnicima" koji apsorbiraju, reflektiraju i raspršuju energiju valova (Nordstrom, 1994). Žala su u prošlosti bila udaljena od naseljenih zona. U posljednjih šezdesetak godina za njima je sve veća potražnja zbog razvoja kupališnog turizma. No istraživanja su pokazala da je tendencija većine današnjih svjetskih žala, njih 70%, erozija. Erozijska žala može biti rezultat bilo kojeg prirodnog ili antropogenog utjecaja na donos sedimenta te njegov uzdužni ili poprečni transport na obali (Bird, 1996).

Početkom istraživanja obala, odnosno konkretnije morfologije žala, smatra se priprema terena za napad na Normandiju tijekom 20. st (2. svj. rat). Od tada dolazi do naglog porasta istraživanja obalnih prostora, posebno u zadnja tri desetljeća (Anthony, 2005). Obalna područja posebno su ugrožena masovnim turizmom i pretjeranom urbanizacijom pod čijim je utjecajem čak 50 % svjetske obale. Osim toga, nekontrolirana gradnja radi nepostojanja prostornih planova ili njihove nezadovoljavajuće primjene te neadekvatno implementirana industrija (eksploatacija prirodnih resursa - nafte i plina) neki su od bitnijih čimbenika koji utječu na promjenu obala. Mogućim rješenjima za utjecaj navedenih čimbenika na obalu bave se stručnjaci za obalno prostorno planiranje. Ono se definira kao postupak usklađivanja djelatnosti u obalnom području, u cilju zadovoljavanja svih aspekata održivog razvoja, a temelji se na ekonomskim, društvenim i ekološkim načelima.

Hrvatska obala u posljednjih par desetljeća također prolazi intenzivne promjene, najviše vezane za turizam i izgradnju. S obzirom na relativno malen udio duljine žala u ukupnoj duljini obale (~5 %; Pikelj i Juračić, 2013), nasipavanjem se mnoga prirodna žala u Hrvatskoj proširuju, a umjetna žala grade. Žala oblikovana u plavinskome materijalu potopljenih krških dolina i jaruga najčešći su tip žala duž hrvatske obale. Tokovi tih jaruga i dolina također su danas antropogeno modificirani, što utječe na smanjenje prirodnoga hranjenja žala (Juračić i dr., 2009). U svrhu daljnjeg održivog upravljanja obalom, a posebice žalima kao njenim za Hrvatsku značajnim resursom nužno je pratiti procese koji se na njima događaju.

Osnovni cilj ovog diplomskog rada bio je uvrstiti morfološke promjene na umjetnom žalu Dugi Rat ovisno o promjenama vremenskih prilika i stanja mora tijekom dvogodišnjeg perioda, te nakon redovitog nasipavanja. Glavna metoda koja je pri tome korištena je *Structure-from-Motion* (SfM) fotogrametrija. Ona uključuje izradu elevacijskih modela žala čija se izrada temelji na nizovima digitalnih fotografija uz pomoć specijaliziranog računalnog programa. Prateća metoda je granulometrija, koja je korištena za definiranje temeljnih karakteristika sedimenta duž žala.

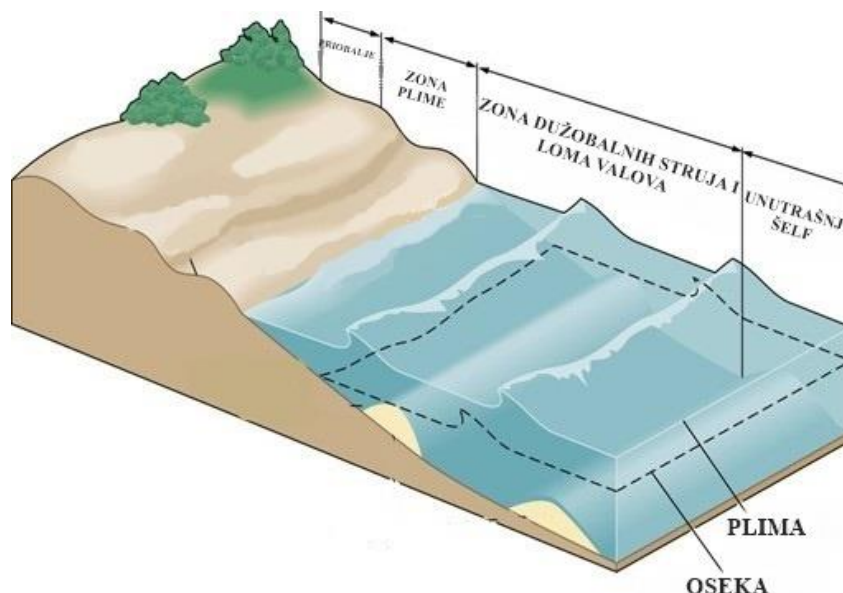
2. KRATKI PREGLED METODA U ISTRAŽIVANJU ŽALA

S obzirom na potrebu mjerenja i istraživanja obale, razvoj tehnologije u posljednjih četrdeset godina omogućio je i razvoj novih metoda i tehnika. Razmatrajući teren predviđen za mjerenje, kao i svu potrebnu opremu te izvodače mjerenja, tehnike se sve više međusobno isprepliću te zbog svojih nekih značajki i prednosti jedne dominiraju nad drugima.

2.1. *In situ* metode praćenja i mjerenja geomorfoloških promjena na žalima

2.1.1. Mjerenje profila

Izrada profila žala jedan je od najčešće korištenih načina u praćenju promjena u geomorfologiji obala. Mjerenje profila žala, tzv. profiliranje, provodi se kako bi se utvrdila promjena granica obalne crte za vrijeme plime i oseke, zatim oblik i opća morfologija žala, kako bi se procijenila učinkovitost zaštite žala ako neki oblik zaštite postoji, te kako bi se pratile godišnje sezonske promjene. Istraživači prilikom korištenja ove tehnike moraju dobro poznavati obalne procese kako bi razumjeli kretanja u zoni valova, jakih morskih struja te nagib žala odnosno njegovu kompletnu morfologiju (Slika 1). Duljina i razmak istraživanih profila ovise o namjeni istraživanja (Kraus, 2005).



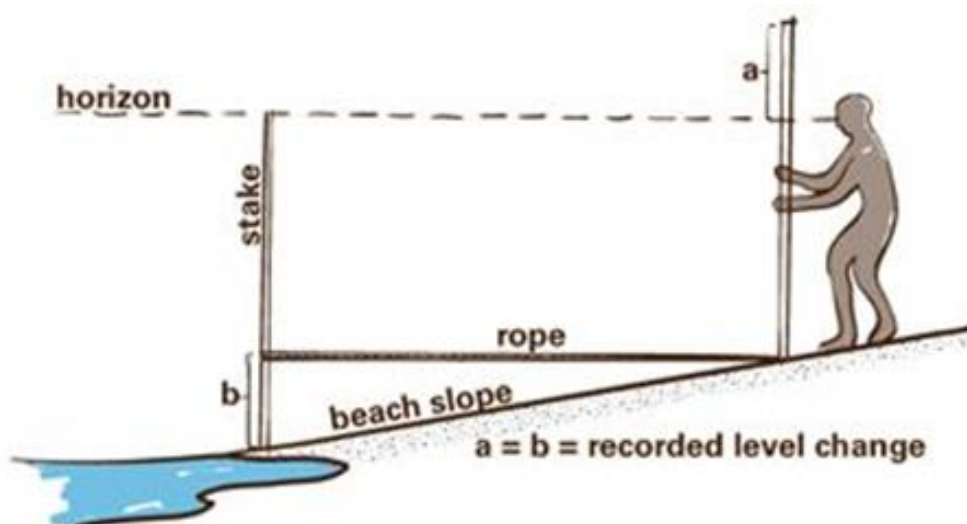
Slika 1. Prikaz profila žala (Prema: Brooks i Cole, 2005; Internetski izvor 1).

Profiliranje žala započinje s kopnene strane prema morskoj od uspostavljene kontrolne točke, uz unaprijed određeni pravac s poznatim azimutom. Početna točka postavlja se na klif ili potporni zid na obali, te se mjerenje nastavlja prema moru, najčešće do dubine zatvaranja (eng. *depth of closure*) (Kraus i dr., 1999). Ako je istraživanjem obuhvaćeno veće područje na kojem je prisutno kretanje sedimenta, promjene u volumenu žala mogu se mjeriti određivanjem razlike između mjerenja dvaju profila provedenih u različitim terminima.

2.1.1.1. Emeryjeva metoda

Jedna od starijih i možda najjednostavnijih tehnika za mjerenje profila žala poznata je pod nazivom Emeryjeva metoda. Aparatura se sastoji od dva štapa povezana užetom poznate duljine (5-10 m) (Slika 2). Njihova duljina je interval mjerenja za pojedine točke duž profila. Ako je žalo nagnuto prema morskoj strani promatrač gleda preko vrha prema razini horizonta i određuje udaljenost od vrha kopnene strane do vidljive linije promatranja. Ako je žalo nagnuto prema kopnenoj strani onda se udaljenost mjeri od morske strane i promatrač gleda preko vrha, prema razini horizonta i određuje udaljenost od vrha morske strane do vidljive linije promatranja (Komar, 1998; Emery, 1961).

Neke od glavnih prednosti ove metode su pristupačna cijena aparature i materijala, te mogućnost nošenja jednostavne opreme na udaljenija područja istraživanja, no glavni je nedostatak što je metoda relativno spora (Komar, 1998).

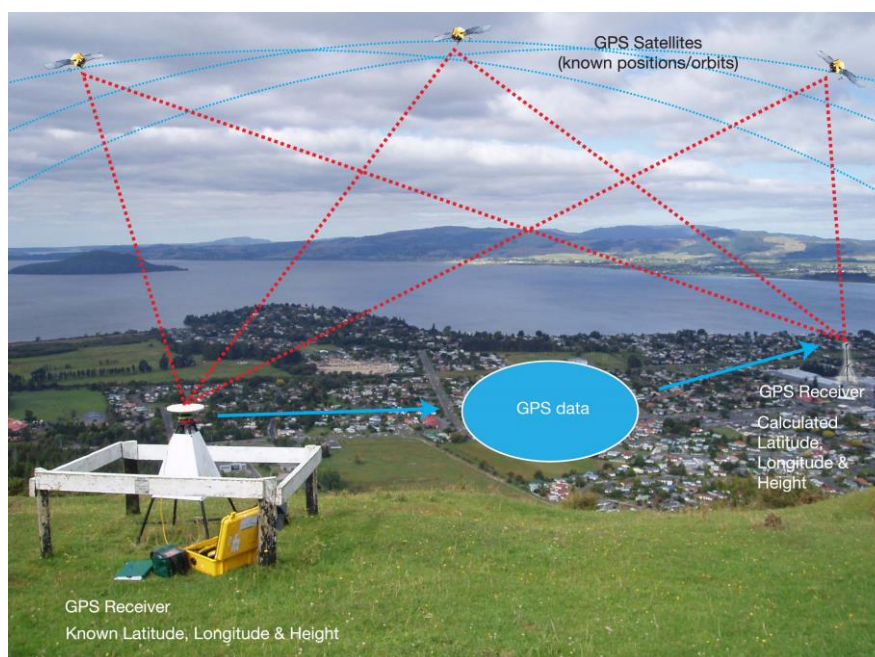


Slika 2. Emeryjeva metoda mjerenja profila žala (Komar, 1998).

2.1.1.2. GPS profiliranje

Novija metoda profiliranja žala koja se i danas često primjenjuje je tzv. GPS (*Global Positioning System*) profiliranje. GPS je globalni navigacijski satelitski sustav koji se sastoji od ≥ 24 satelita raspoređenih na 6 orbitalnih ravnina, a koji kruže oko Zemlje svakih 12 sati (2 puta dnevno) na visini od 20 000 km. Oprema za profiliranje pomoću GPS-a sastoji se od disk-antene montirane na tripodu koja prima podatke od satelita, antene koja prenosi informacije i prijenosnog odašiljača koji prikuplja podatke (Slika 3). GPS navodi operatera duž rute kroz grafičko sučelje, pokazujući i udaljenosti van staze. Prema tome moguće je slijediti liniju i snimati (x,y,z) koordinate točaka. Izmjera počinje na najvišoj točki kopnenog dijela i nastavlja se do prve dubine mjerene dubinomjerom, osiguravajući potpunu pokrivenost žala.

Prednosti korištenja GPS-a kao direktnog izvora podataka su pored brzog pribavljanja prostornih koordinata, četvrta dimenzija koju daje GPS kao direktno mjerenu veličinu, realno vrijeme, indirektna veličine kao što su azimut i brzina gibanja između dvije točke te ocjena točnosti (Morton i dr., 1993).



Slika 3. GPS profiliranje (Internetski izvor 2).

2.2. Daljinske metode praćenja i mjerenja geomorfoloških promjena na žalima

Tehnike daljinskih istraživanja pokazale su se u novije vrijeme kao najprikladnije rješenje za obavljanje terenskih mjerenja u nepovoljnijim uvjetima, kao npr. tijekom oluje i kod nepristupačnih područja. Starije studije o eroziji obala koristile su mjerenja točaka pojedinih zračnih snimaka za određivanje promjena obalne linije. Godine 1983., američko društvo za fotogrametriju i daljinska istraživanja donijelo je formalnu definiciju daljinskih istraživanja prema kojoj su ona definirana kao mjerenje ili stjecanje informacija nekog svojstva ili objekta pomoću uređaja za snimanje koji nije u fizičkom kontaktu s objektom (Jensen, 2000).

2.2.1. Aerofotografija

Aerofotografija je jedna od metoda koja se osim za vojne namjene, kao primarnu svrhu koristila i za praćenje obalnih ekosustava s uzvišenog područja. Ova metoda omogućuje određivanje i postavljanje obalne linije na topografskim kartama.

Postupak je unaprijed jasan; stabilne referentne točke kao što su zgrade i prometnice označene su na avio snimkama koje su ponavljanjem snimljene kroz nekoliko godina. Uglavnom se mjeri udaljenost između tih točaka i obalne linije (tipično granice između „suhog i mokrog dijela žala“, odnosno približne granice visoke vode). Promjena u udaljenosti daje informacije o brzini promjene obalne linije na istraživanoj lokaciji (Dolan i dr., 1980). Avionske snimke pogodne su kao izvor preciznih prostornih podataka, a snimaju se posebnim kamerama iz vertikalne perspektive odnosno ortogonalno (ravno prema tlu) (Slika 4).



Slika 4. Način snimanja avio snimaka (Internetski izvor 3).

Mjerilo kod avionskih snimaka određeno je visinom snimanja (H) i žarišnom duljinom (f) (Lužar-Oberiter, 2016/2017). Kombinacija topografskih i nautičkih karata te aviosnimke koriste se za točnu procjenu pomicanja obalne linije. Velik broj geoloških opasnosti (odroni stijena, klizišta, obalna erozija itd.) razumljiviji je kroz usporedbu prošlih i sadašnjih podataka izmjere.

Međutim, kao i svaka druga metoda izmjere, aerofotografija ima svoje nedostatke, npr: pravilna kalibracija kamere, nagib aviona/kamere (uzrokuje distorziju zbog perspektive), prikaz topografije terena (neki objekti su na višoj nadmorskoj visini, tj. bliže kameri pa su automatski većeg mjerila i pomaknuti), adekvatna provjera razine tla te problemi vezani uz vremenske neprilike koji mogu smanjiti čistoću fotografija (Miller i dr., 2007).

2.2.2. Video snimanje

Tehnika video snimanja obalnog prostora je sve više korištena u posljednjih tridesetak godina. Jedno od glavnih obilježja ove tehnike je da pruža mogućnost kontinuiranih nizova vremenskih i prostornih mjerenja, od poprečnih profila do čak nekoliko kilometara obale s intervalima uzorkovanja postavljenim ovisno o potrebama mjerenja (Nieto i dr., 2010). Video nadzor priobalnog okruženja koristi se za određivanje nagiba žala, priobalne dubine, perioda i smjera vala, itd (Miller i dr., 2007). Sustav s opremom je obično montiran na okvir skele s više kamera jednako razmaknutih na određenoj visini (oko 1,5 m) (Slika 5) (Turner i dr., 2008). Neki od poznatijih automatiziranih video sustava su: ARGUS, CAM-ERA, SIRENA, HORUS itd (Nieto i dr., 2010).



Slika 5. Tehnika video snimanja (Internetski izvor 4).

Unatoč prednostima ove tehnike kao što je visoka prostorna i vremenska rezolucija, glavni su nedostaci teškoća mjerenja tijekom snažnih oluja, potrebno je mnogo svjetla za snimanje te potreba za stalnim ažuriranjem topografskih podataka (mogućnost promjena visina nagiba) (Turner i dr., 2008).

2.2.3. Laserski skeneri

U novije se vrijeme sve više na žalima, tijekom različitih vremenskih i valnih uvjeta primjenjuje laserska tehnologija za mjerenje morfoloških i hidroloških značajki.

LIDAR (*Light Detecting And Ranging*) je tehnika prostornog laserskog skeniranja koja može biti iz zrak (ALS- *Airborne Laser Scanner*) i sa zemlje (TLS- *Terrestrial Laser Scanner*). Koristeći automatske i polu-automatske tehnike filtriranja podataka moguće je iz izvornih podataka kreirati nekoliko proizvoda: digitalni model reljefa (*Digital Elevation Model*), digitalni model površine (*Digital Surface Model*) i digitalni model terena (*Digital Terrain Model*).

Terestrički laserski skener (Slika 6) funkcionira na principu odašiljanja laserske zrake prema objektu izmjere i primanja te iste zrake nakon njenog odbijanja od objekta. Snimanje objekta obavlja se s više stajališta, a za povezivanje susjedne snimke potrebno je imati najmanje tri iste točke na obje snimke (Basa i Juraj, 2011).

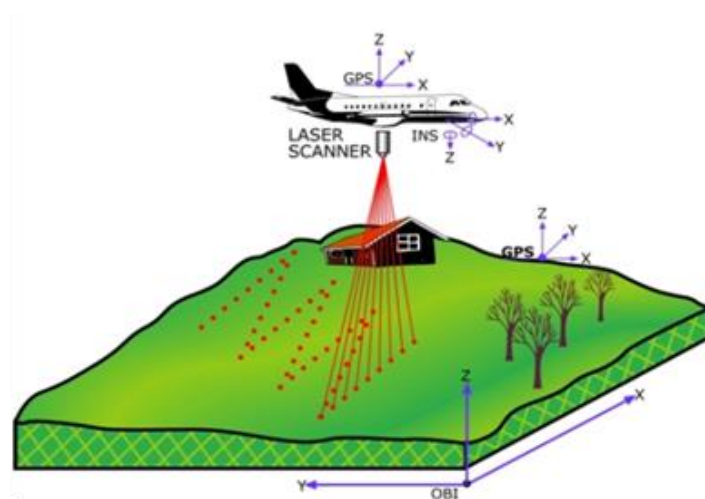


Slika 6. Terestrički laserski skener (Internetski izvor 5).

Skener snima vrlo gustu mrežu točaka na željenoj plohi, a gledajući s praktične strane ne troši se vrijeme na hodanje do objekta već skener „hoda“ umjesto istraživača. Nakon što skener prikupi veliki broj podataka, naknadna obrada podataka je kompliciranija te ujedno i najveći dio posla. Za razliku od terestričkog, laserski skener kojim se snima istraživano područje iz zrakoplova detektira daljinu od zrakoplova do površine zemlje snimanjem vremenske razlike između odaslanih i reflektiranih laserskih pulseva (Slika 7). Rotirajuće ogledalo montirano ispred lasera omogućuje skeniranje objekta s više strana što u konačnici znači veću pokrivenost prostora kojim zrakoplov prolazi. Takva oscilacija ogledala skenera u kombinaciji s kretanjem zrakoplova u dva smjera stvara tzv. „cik cak“ uzorak u zraku. Rezultat je skeniranja kao i kod terestričkih skenera oblak točaka.

Mnoštvo je recentnih istraživanja tijekom posljednjih godina geomorfologije obale i obalnih hazarda provedeno upravo putem LIDAR-ALS tehnologije (Carter i dr., 1998; Sallenger i dr., 1999; Krabill i dr., 2000). Ova tehnologija pruža bolje razumijevanje sezonskih i godišnjih promjena na obali te izgleda obale nakon snažnih oluja.

Velika prednost skenera je snimanje objekata koji nisu pristupačni, snimanje u opasnim područjima te u onima koja se ne mogu snimiti klasičnim geodetskim metodama. Pokazalo se kako laserski skener, radeći iz daljine i potencijalnim mjerenjem milijuna točaka, uspostavlja geometriju objekta s visokom preciznošću čak i za potrebe preciznih metričkih računanja (Saravanan i dr., 2014). Osim toga, za vrijeme snimanja skenerom mogu se pripremati drugi objekti za snimanje, pregledavati dosad snimljeni rezultati itd. Glavni nedostatak skenera općenito je visoka cijena i komplikacije u prenošenju opreme.



Slika 7. Prikaz ALS opreme za lasersko skeniranje (Internetski izvor 6).

2.2.4. Fotogrametrija

Zadnjih nekoliko desetljeća ili od njene pojave, klasična fotogrametrija je postala široko rasprostranjena tehnika za trodimenzionalno modeliranje odnosno izradu 3D oblaka točaka nekog objekta (Remondino i El-Hakim, 2006).

Fotogrametrija općenito je tehnika određivanja oblika, položaja ili veličine nekog objekta mjerenjem, snimanjem i interpretacijom fotografija. Na osnovi jedne fotografije moguće je određivanje dvodimenzionalnih svojstava objekta koji su približno ravni.

S druge strane, kako bi se odredila trodimenzionalna svojstva objekta potrebne su minimalno dvije snimke iz različitih kutova snimanja uz odgovarajuće uzdužno i poprečno preklapanje. Takve se snimke nazivaju stereoparovi, a trodimenzionalni model područja ili objekta snimanja nastaje na mjestu preklapanja stereoparova (stereofotogrametrija). Prema položaju snimališta razlikujemo aerofotogrametriju (snimanje objekata iz zrakoplova, satelita...) i terestričku fotogrametriju (objekt se snima s tla). Snimanje se obavlja pomoću posebno građenih i kalibriranih kamera koje omogućuju lakšu orijentaciju snimke tj. rekonstrukciju geometrijskih odnosa prilikom snimanja (Internetski izvor 7).

Osim klasičnog načina fotogrametrijskog snimanja danas se sve više koriste bespilotne letjelice (UAV- eng. *unmanned aerial vehicle*) (Slika 8) koje su sposobne izvršiti kontinuirani let bez pilota (Bento, 2008). Osnovni zahtjevi koje bespilotne letjelice moraju zadovoljiti da bi se mogle koristiti za fotogrametrijsko snimanje su: mogućnost izvođenja projektiranog plana leta s visokom točnošću, mogućnost nosivosti opreme za snimanje i navigaciju, autonomija leta letjelice, smanjenje vibracija i ostalih vanjskih utjecaja tijekom leta.



Slika 8. Bespilotna letjelica (dron) (Internetski izvor 8).

Usporedbom primjene bespilotnih letjelica i klasične aerofotogrametrije važno je spomenuti, osim samog područja snimanja i vremensku dimenziju podataka. Naime, kod bespilotnih letjelica ona omogućuje realniji prikaz stvarnog stanja na terenu jer relativno mala visina leta eliminira utjecaj negativnih atmosferskih prilika kao što su oblaci ili slaba magla te omogućuje brzu reakciju i trenutno prikupljanje (Kolarek, 2010).

Glavni nedostatak klasične fotogrametrijske tehnike je visoka cijena kalibriranih fotogrametrijskih kamera te podložnost pogreškama 3D modela. Dodatno, potrebno je poznavati i položaj kamere kako bi mogli rekonstruirati model prostora.

SfM fotogrametrija rješava ovaj problem upotrebom skupine digitalnih fotografija koje se međusobno preklapaju koristeći pri tome u tu svrhu razvijene računalne programe (James i Robson, 2012; Bemis i dr., 2014; Ružić i dr., 2014; Pikelj i dr., 2015). Ova metoda je korištena pri izradi ovog diplomskog rada i detaljnije je opisana u poglavlju Materijali i metode.

3. GEOLOŠKE, GEOMORFOLOŠKE I GEOGRAFSKE KARAKTERISTIKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

3.1. Geološki razvoj područja istočne obale Jadranskog mora

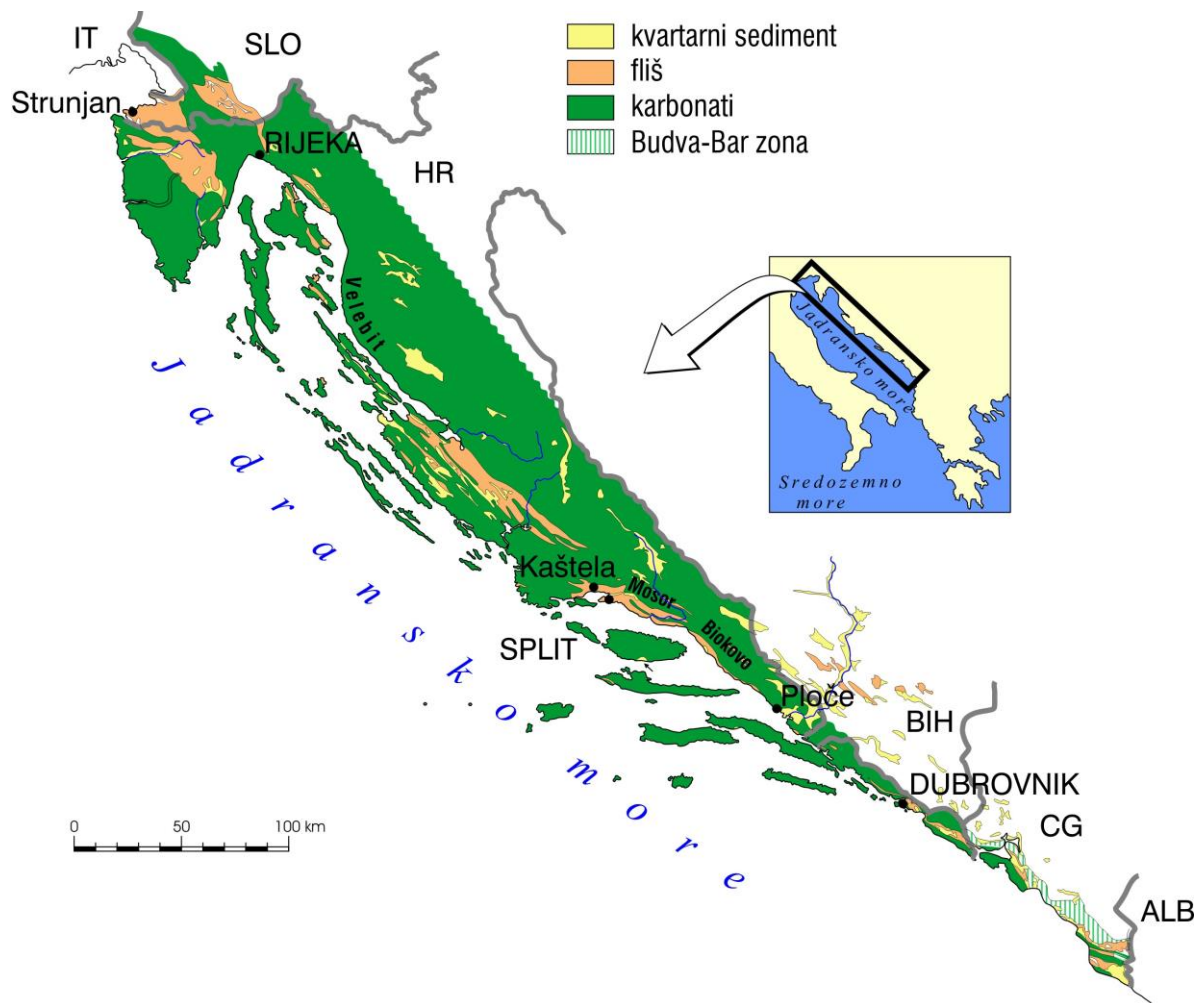
Sastav i izgled današnjeg reljefa istočne obale Jadranskog mora utemeljen je prije gotovo 240 milijuna godina tijekom srednjeg trijasa, kada je na izoliranoj platformi formiranoj na jadranskoj (Adria) mikroploči počela plitkomorska sedimentacija (Vlahović i dr., 2005). Današnji tektonski okvir istočne Jadranske obale je konačno formiran u razdoblju od miocena do donjeg pliocena. Njega karakteriziraju rasjedi, bore i navlačne strukture s glavnim smjerom pružanja sjeverozapad-jugoistok (Korbar, 2009).

Izdignute i vrlo tektonizirane, pretežito karbonatne strukture, bile su, kako pretpostavljaju Mocochain i dr. (2009), okršavane od miocena, a to se okršavanje nastavlja sve do danas. Okršeni reljef je u više navrata bio izložen izrazitim promjenama u okolišu tijekom pleistocenskih fluktuacija morske razine.

Konačan izgled obalni prostor je poprimio nakon posljednje transgresije zbog otapanja leda nakon zadnjeg ledenog doba početkom holocena, kada je razina mora porasla za više od 100 m i potopila krški reljef. Vrhovi nekadašnjih primorskih planina postali su otocima (antiklinale), a bivše doline su sada zaljevi i morski kanali (sinklinale). Kao rezultat toga, smjer pružanja otoka prati smjer planina na kopnu. U svjetskoj se literaturi za ovaj tip obale upotrebljava naziv „Dalmatinski tip obale“ (Fairbridge, 1968; Kelletat, 2005).

Prema Shepardovoj (1937) klasifikaciji obala, istočna obala Jadrana se može nazvati primarnom obalom nastalom erozijom na kopnu (u ovom slučaju okršavanjem) te naknadnim potapanjem uslijed porasta razine mora. Prema drugim klasifikacijama može je se definirati visokom, stjenovitom, potopljenom, erozijskom i konvergentnom obalom.

Litološki gledano, u građi istočne obale Jadrana dominiraju (90%) mezozojski karbonati (vapnenci, dolomiti i karbonatne breče) djelomično prekriveni naslagama boksita i zemlje crvenice tzv. „*terra rossa*“. Manji udio, oko 6% dužine obale zauzima eocenski fliš sastavljen od lapora, prahovnjaka, pješčenjaka i karbonatnih breča (Slika 9). Naslage fliša, ali i karbonata često su prekrivene sedimentima kvartarne starosti. Izuzetno mali udio istočne Jadranske obale građen je od magmatskih stijena i piroklastita (otoci Jabuka i Brusnik te Komiža na otoku Visu) (Pikelj i Juračić, 2013).



Slika 9. Politička i pojednostavljena litološka karta istočne obale Jadranskog mora
(prema Pikelj i Juračić, 2013).

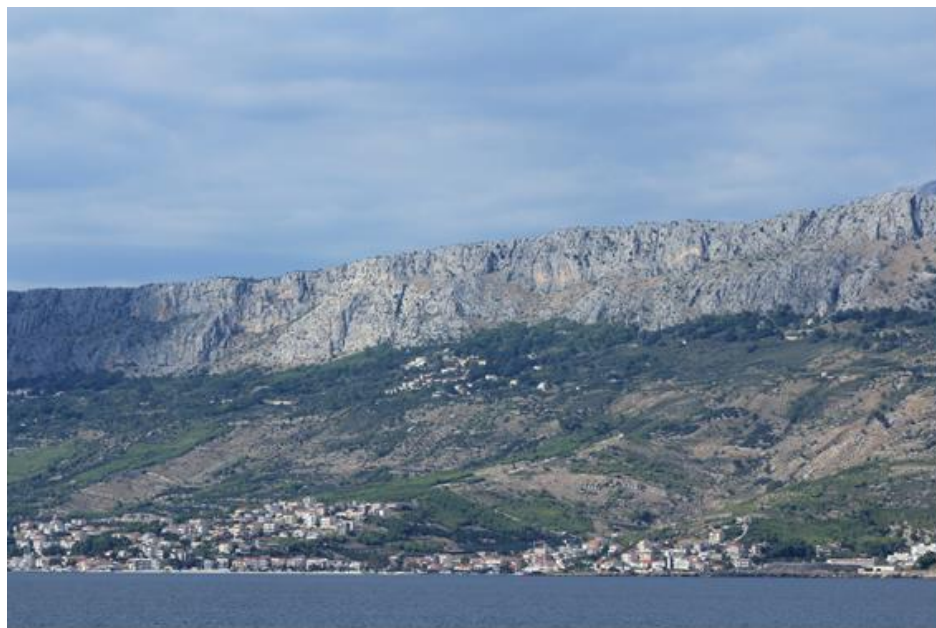
3.2. Geološke i geomorfološke karakteristike područja Dugi Rat

Šire istraživano područje tektonski pripada području Vanjskih Dinarida, a karakterizirano je visokim stupnjem tektonske poremećenosti uslijed zbivanja koja su trajala od starijeg mezozoika do danas. Prostor je izgrađen pretežito od karbonatnih i klastičnih naslaga mezozojske i kenozojske starosti (Marinčić i dr., 1977).

Na širem području istraživanja sedimentacija karbonata odvijala se kontinuirano tijekom mezozoika na plitkoj i stabilnoj karbonatnoj platformi. Kraj mezozoika obilježen je značajnijim izdizanjem Dinarida, nakon čega slijedi snažno okršavanje i stvaranje krškog reljefa. Uslijed okršavanja u dubljim depresijama se talože boksitične naslage.

Tijekom regionalne transgresije u donjem paleogenu talože se breče, pločasti vapnenaci, nakon kojih se tijekom donjeg i srednjeg eocena talože foraminiferski vapnenci (Marinčić i dr., 1977). Snažne deformacije nastavljaju se tijekom gornjeg paleocena i donjeg eocena, kada nastaje tipičan ljuskavo-borani tektonski sklop. Ovakva ljuskava građa (Slika 10) prepoznatljiva je po prevrnutim izoklinalnim borama, ljuskavo raskidanima i reversno naslonjenima na eocenski fliš (Marinčić i dr., 1977).

U građi užeg područja Dugog Rata i drugih mjesta uz obalu (pr. Podstrana, Sv. Martin, Krilo itd.) dominira fliš. Erozijsko-diskordantnu granicu prema gornjo-krednim (senonskim) vapnencima s lećama dolomita ($^3K^3_2$) ovdje obilježavaju srednje-eocenske breče i brečo-konglomerati s fragmentima foraminiferskog vapnenca ($^1E_{2,3}$) na kojima slijede tankouslojeni eocenski kalkareniti ($^2E_{2,3}$). Oni karakteriziraju prijelaz iz breča u fliš ($^3E_{2,3}$) koji u najvećoj mjeri izdanjuje na području Dugog Rata. Fliš ovdje čine pješčenjaci i detritični vapnenci u izmjeni s laporima. Za razliku od pješčenjaka i detritičnih vapnenaca, lapori nisu uslojeni. U području od Sv. Martina do Krila na eocenskom flišu su istaložene kvartarne breče (Slika 10), u čijem sastavu se mogu naći fragmenti karbonatno-klastičnih stijena jurske, kredne i/ili kenozojske (paleogenske i neogenske) starosti. Procjenjuje se da je njihov transport bio relativno kratak, a značajnija debljina je posljedica taloženja u hipsometrijski nižim područjima (Marinčić i dr., 1976; Marinčić i dr., 1977; Marinčić, 1981).



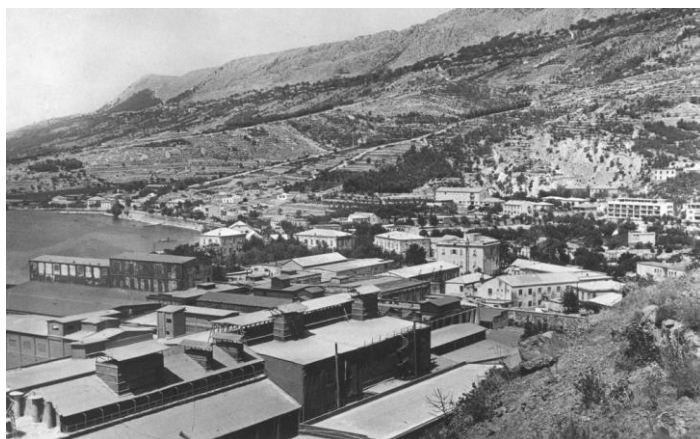
Slika 10. Detalj ljuskave strukture u istraživanom području - pogled na Dugi Rat iz Bračkog kanala
(Fotografirala: K. Pikelj).

3.3. Geografske značajke Dugog Rata

Dugi Rat je općina koja se nalazi u srednjoj Dalmaciji, 15 km jugoistočno od Splita. Ukupna površina općine iznosi 15,6 km², a prostorno se proteže od vrhova planine Mosor do obale Bračkog kanala. Obalna naselja u općini povezuje Jadranska magistrala u dužini od oko 9 km od ušća Cetine na jugoistoku do općine Podstrana na sjeverozapadu (Baučić, 2000).

Početkom 20. stoljeća, za razliku od drugih, tada uglavnom poljoprivredi orijentiranih naselja, u Dugom Ratu je podignuta jedna od prvih tvornica u Dalmaciji (Slika 11). Električna energija za potrebe tvornice kalcijeva karbida i kalcijeva cijanamida dobivena je korištenjem jednog dijela vodenih snaga rijeke Cetine podizanjem električne centrale u Kraljevcu. Općem razvoju ovog kraja i turizma pridonijelo je i moderniziranje i asfaltiranje Jadranske magistrale 60-ih godina prošlog stoljeća. Uz razne pogodnosti za stanovništvo, trasirana je uz samu obalu i na taj način suzila je obalni prostor, a bila je i izvor raznih zagađenja (Petrić, 2000).

Početkom šezdesetih godina 20. stoljeća, kada je izgrađena magistrala, to se područje počelo intenzivnije razvijati. Turizam je postajao sve važnija gospodarska grana, a antropogene aktivnosti u cijelom su se području intenzivirale i značajno ga preobrazile. Mala agrarno-stočarska naselja, u prošlosti smještena na padinama podalje od mora, danas su uglavnom napuštena, a nova središta kupališnog turizma osnovana su na obali. To se ogleda u povećanom broju građevinskih radova nedaleko od mora, pretežno izgradnji kuća i apartmana, ali i izgradnji različitih obalnih konstrukcija duž same obalne crte. Prilikom izgradnje magistrale i kuća, čiji su temelji usijecani u strme padine, velika se količina materijala (pretežno flišnoga) odlagala u užemu obalnom prostoru, kako u Dugom Ratu, tako i na širem okolnom području. Na taj način već jako rano ljudske aktivnosti ometaju prirodne procese i prirodni razvoj žala (Rajčić i dr., 2010).



Slika 11. Dio tvorničkih zgrada u Dugom Ratu prije 1970-ih
(Ljubaznošću Mladena Banovića).

U reljefu Dugog Rata mogu se izdvojiti tri različita uzdužna dijela: planina Mosor, flišna padina i obalna naplavina. Planina Mosor, izgrađena od krednih vapnenaca strmo je nagnuta prema jugozapadu gdje na nadmorskoj visini od 250-300 m naliježe na fliške naslage. Najveći dio Dugog Rata zauzima fliš koji je podložen eroziji pa je pretežno prekriven rahlim tlom pogodnim za rast vegetacije (Slike 9 i 10).

Prostor općine Dugi Rat osim mediteranskih klimatskih obilježja ima i značajnih mikroklimatskih sposobnosti. Reljefna eksponiranost prema jugu štiti je od nepovoljnih utjecaja jakih i hladnih sjevernih vjetrova (bure) te najvećem dijelu općine u zimskom dijelu godine osigurava povoljnija klimatska obilježja od onih prosječnih za srednju Dalmaciju. S druge strane, istočni dio općine ima u zimskom dijelu godine učestaliji utjecaj bure i juga, ali je zaštićen od velikih valova koje povremeno stvara jugozapadni vjetar lebić. U ovom je djelu manje izražen ljetni osvježavajući dnevni vjetar maestral dok se jače u ostalom djelu osjeća utjecaj noćnog burina (Baučić, 2000).

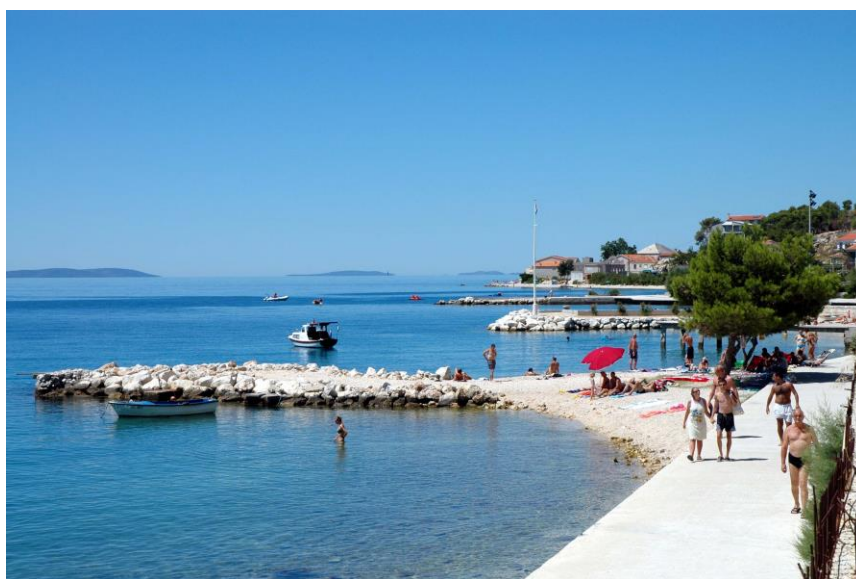
3.3.1. Žalo Dugi Rat

Istraživani dio umjetnog žala Dugi Rat nalazi se na području istoimenog naselja u dužini od oko 80 m s pružanjem zapad-sjeverozapad, jug-jugoistok (Slika 12). Današnji izgled žala posljedica je dugogodišnjega antropogenog djelovanja. Naime, žalo u pravom smislu riječi ovdje nije postojalo, a magistrala je u najvećem dijelu naselja bila poduprta zidom do kojeg je dopiralo more. Početkom 80-ih godina uz zid je sagrađena betonska šetnica (Slika 13).

Od 2005. godine započeli su radovi na formiranju podloge žala nasipavanjem krupnijih komada stijena i izgradnjom pera (Slika 13), nakon čega slijedi nasipavanje sitnijim materijalom. Od 2008. godine redovito nasipavanje odvija se na godišnjoj bazi u proljeće, točnije u travnju. Materijal koji se nanosi na žalo pred svaku turističku sezonu je drobljeni vapnenac iz kamenoloma na Mosoru, a najveći dio materijala je raspona veličine zrna 4-8 mm. Redovito nasipavanje bez vidljivog proširivanja žala ukazuje na njegovu konstantnu eroziju. Istraživani dio je podijeljen na dva dijela betonskim molom, te su u ovom radu nazvani sjevernim (sjeverozapadno od betonskog mola) i južnim (jugoistočno od betonskog mola) dijelom žala (Slika 12).



Slika 12. Satelitska snimka žala Dugi Rat (Google Earth, 2016).

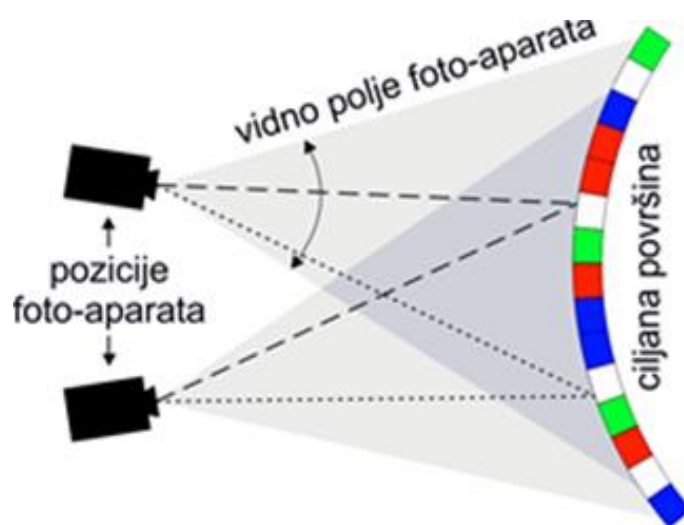


Slika 13. Izgled žala Dugi Rat 2005. godine
(Ljubaznošću Turističke Zajednice Dugi Rat).

4. MATERIJALI I METODE

4.1. SfM fotogrametrija

Za postizanje postavljenog cilja ovog istraživanja korištena je metoda *Structure from Motion* (SfM) fotogrametrija. Metoda zahtijeva da se objekt istraživanja, u ovom slučaju žalo, snimi nizom fotografija, obilazeći objekt u krug. Pri tome je potrebno pripaziti da tijekom jednog „kruga“ odnosno niza fotografija svaka susjedna fotografija sadrži $\geq 60\%$ dijela prethodne fotografije, kako bi bili ispunjeni uvjeti preklapanja nužni za daljnju obradu (Slika 14). Također, za kasnije georeferenciranje područja nužno je da na najmanje tri fotografije budu vidljive najmanje tri zajedničke referentne točke. To su georeferencirane točke kojima je prethodno određen položaj mjerenjem uz pomoć GPS uređaja. One osim lakšeg povezivanja zajedničkih piksela na svakoj fotografiji omogućuju i georeferenciranje istraživanog prostora i daljnju obradu podataka. Prilikom fotografiranja važno je da objekt fotografiranja uvijek bude dominantan na fotografiji, tj. potrebno je fotografije snimati tako da se uhvati što manje okolnog prostora. Kako bi se pokrila sva područja poželjno je snimati fotografije na različitim visinama. Dodatno, prilikom fotografiranja nije poželjno koristiti bljeskalicu zbog promjena u osjetljivosti, a osjetljivost fotoaparata potrebno je podesiti tako da fotografije budu dobro eksponirane. Sve preeksponirane i podeksponirane slike nije poželjno koristiti za obradu.



Slika 14. Način snimanja objekta SfM metodom (Bemis i dr., 2014).

SfM fotogrametrija za razliku od klasične fotogrametrije ne zahtijeva poznavanje položaja koordinata fotoaparata. Ovom tehnikom može se odrediti pozicija fotoaparata i geometrija objekta simultano i automatski, na temelju zajedničkih karakteristika fotografija koje se preklapaju, a koje su međusobno odmaknute. Kako bi se prikazala 3D struktura objekta potrebno je snimiti veći broj fotografija koje se preklapaju. Za dobivanje 3D oblaka točaka potrebno je pronalaženje zajedničkih 2D piksela između ulaznih fotografija pomoću programskog algoritma. Oblaci točaka koji se dobivaju nakon obrade u nekom od odabranih programa nisu skalirani i nalaze se u relativnom koordinatnom sustavu kojeg je potrebno pretvoriti u poznati globalni koordinatni sustav, jer točne koordinate snimanja nisu poznate. To se postiže korištenjem željenog broja točaka na objektu s poznatim GPS koordinatama. Relativne se koordinate prilagode apsolutnim koordinatama 3D transformacijom.

4.1.1. Terenski rad

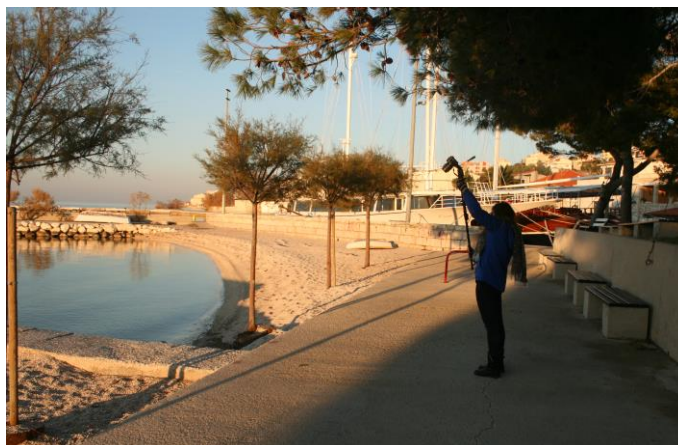
Prvi dio prikupljanja podataka bilo je obilježavanje i geodetsko mjerenje markera. Ukupno ih je izmjereno 25, a njihovo pozicioniranje izvedeno je dvofrekvencijskim RTK GNSS prijamnikom koji daje poziciju u HTRS96 koordinatnom sustavu (Slike 15 i 16.). Dobivena točnost bila je do 2 cm horizontalno i do 4 cm vertikalno.



Slike 15 i 16. Označavanje markera i mjerenje prostornih koordinata GPS prijamnikom
(Fotografirala: K. Pikelj, 2015.).

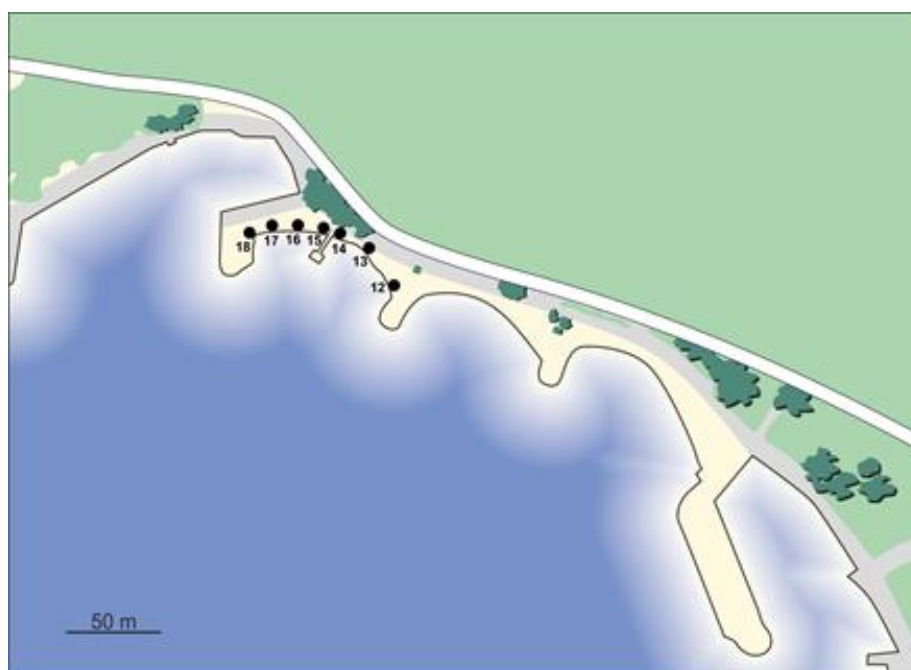
Drugi dio bilo je snimanje fotografija (Slika 17). Ono je obavljeno pet puta: dva puta zimi 2015., jednom ljeti 2015., jednom zimi 2016. i jednom ljeti 2016. Fotografije su snimljene pomoću dva digitalna fotoaparata: Canon EOS 450D i Nikon D3100.

Za efikasnije fotografiranje korišten je i monopod na koji se pričvršćuje fotoaparat, a omogućuje fotografiranje iz zraka, odnosno obuhvaćanje šireg područja nego što se to postiže snimanjem iz ruke. Žalo je fotografirano s kopnene i morske strane, a dodatno i po sredini. Prilikom svakog seta fotografiranja prikupljeno je do 500 fotografija po modelu koje su dalje obrađene u Agisoft PhotoScan računalnom programu.



Slika 17. Snimanje fotografija (Dugi Rat, 2016).

Treći dio terenskog rada bilo je uzorkovanje, a slika 18 prikazuje mjesta uzorkovanja nasutog sedimenta na žalu Dugi Rat krajem kolovoza. Uz pomoć plastične lopatice prikupljeno je 7 uzoraka (DR 12- DR 18) neposredno iznad intertajdala duž žala. Dubina zahvata lopaticom bila je oko 3 cm.

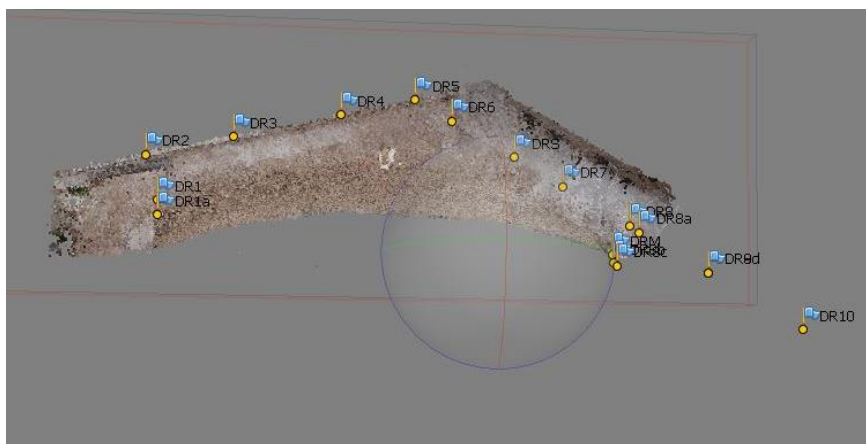


Slika 18. Mjesta uzorkovanja sedimenta.

4.1.2. Protokol generiranja digitalnog elevacijskog modela u Agisoft PhotoScanu

Agisoft PhotoScan je jedan od računalnih programa specijaliziran za SfM-MVS (*Structure from Motion-Multi View Stereo*,) fotogrametriju, a korišten je pri izradi ovog rada. Postupak procesiranja fotografija te konačno izrade elevacijskog modela može se podijeliti u nekoliko ključnih koraka.

Prvi korak je odnosno slaganje slika u cjelinu, a odnosi se na traženje i spajanje zajedničkih točaka na fotografijama. Rezultat takvog povezivanja je rijetki oblak točaka (eng. *sparse point cloud*) napravljen za svaki odjeljak posebno, uz unaprijed postavljene parametre (Slika 19). On prikazuje žalo u prepoznatljivim konturama. Kad je rijetki oblak točaka napravljen, provjerava se da li su sve fotografije spojene. Ukoliko je bilo problema s automatskim spajanjem, postoji mogućnost ručnog poravnavanja. Nakon te provjere, brišu se točke na rijetkom oblaku koje „strše“ tj. koje nisu dio površine iz koje nastaje model.

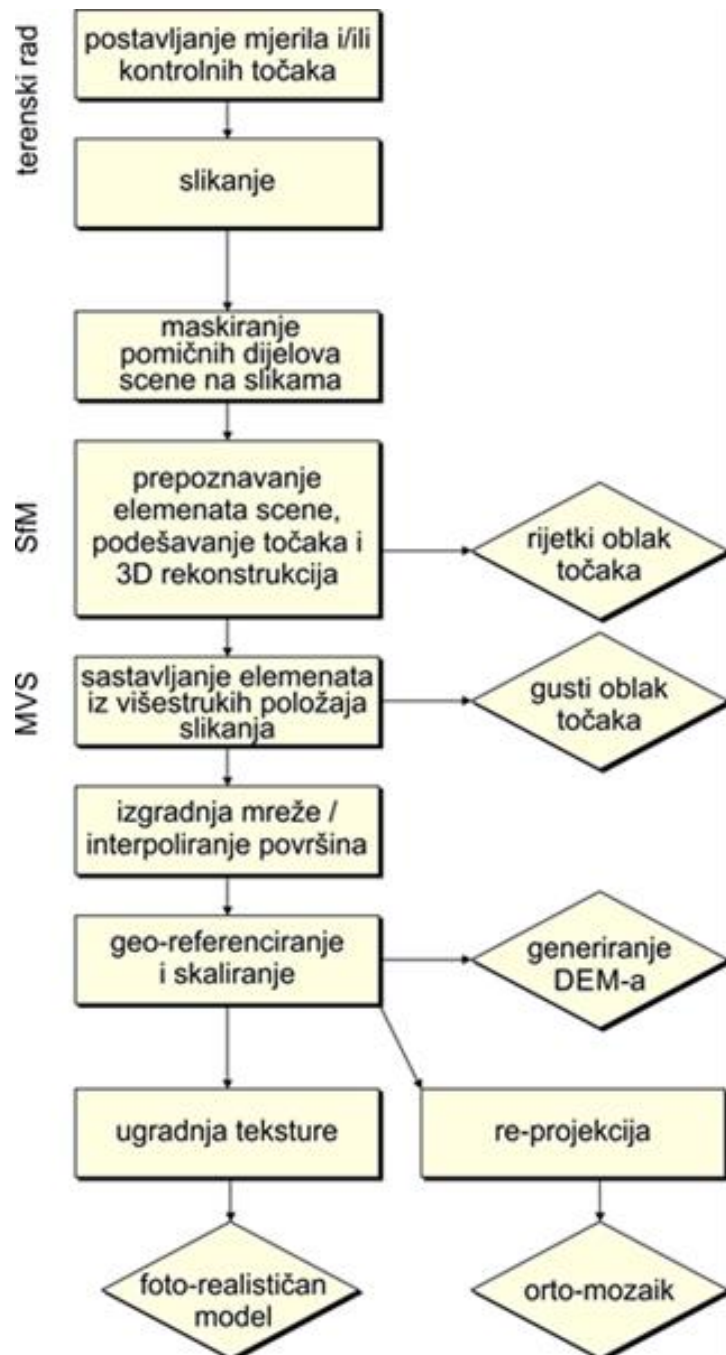


Slika 19. Rijetki oblak točaka (Agisoft PhotoScan, 2016).

Drugi korak je označavanje georeferenciranih markera na fotografijama, a koje se dodaju iz tekstualne datoteke. Prije ubacivanja točaka, odabire se referentni koordinatni sustav. Tijekom ubacivanja točaka na fotografije, nužno je povremeno optimizirati i provjeravati grešku koja bi trebala biti svedena na čim manju mjeru, pr. centimetarsku.

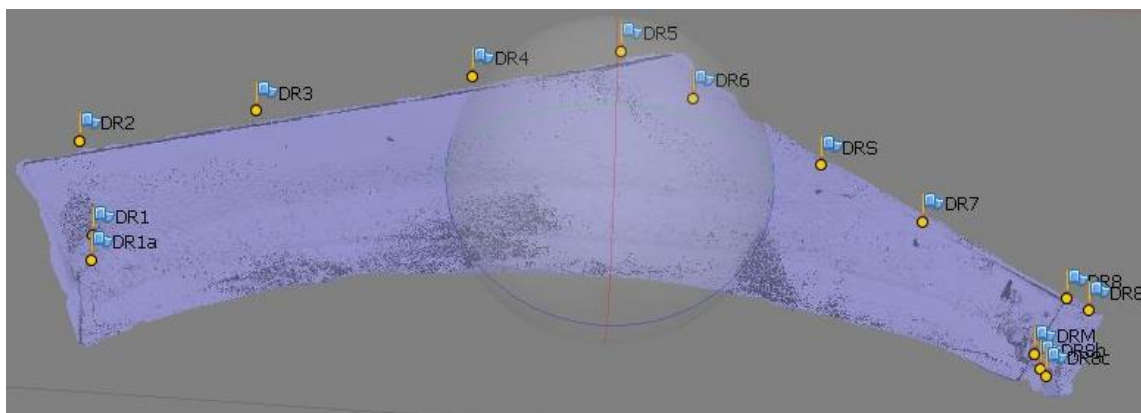
Sljedeći je korak *Multi View Stereo* (MVS) (Slika 20), odnosno sastavljanje elemenata objekta, produkt čega je izrada gustog oblaka točaka (eng. *dense point cloud*). U ovom diplomskom radu gusti oblak je u prosjeku sadržavao do 32,5 milijuna točaka.

Ovako visoka gustoća točaka jedan je od pokazatelja pouzdanosti gustog oblaka, zajedno sa srednjom kvadratnom pogreškom (eng. *Root Mean Square Error*; RMSE). Pogreška dobivenih oblaka točaka kretala se od 1,3 do 3 cm, s tim da je samo jedan oblak imao pogrešku od 5,7 cm. Ovakav raspon pogreške u okviru je točnosti provedenih GPS mjerenja na kontrolnim točkama.



Slika 20. Protokol generiranja 3D modela pomoću SfM-MVS metode (Bemis i dr., 2014).

Radi velikog broja slika rad na pojedinom modelu bio je raspoređen u nekoliko odijeljaka tzv. *chunkova*, koji su zatim spojeni. Predzadnji dio ovog protokola je izrada mreže trokutastih elemenata iz gustog oblaka (eng. *mesh*) (Slika 21).



Slika 21. Prikaz mreže nastale iz gustog oblaka točaka (Agisoft PhotoScan, 2016).

Nakon toga slijedila je izrada DEM-a odnosno digitalnog elevacijskog modela iz nastale mreže točaka. Prije izrade DEM-a podešene su iste granice regije odnosno okolnog prostora po kojima je bio izrađen model. Kada je DEM napravljen, eksportiran je u obliku ascii datoteke i dalje obrađen u Surferu.

4.1.3. Surfer Software

U programu Surfer je prvi korak bio izrada modela s istim prostornim obilježjima kako bi se mogli dobiti podaci o visinskim razlikama, ali i volumenu unutar već prije definiranih granica okolnog prostora. Međusobnim oduzimanjem modela dobiveni su takozvani modeli razlike (eng. *DEMs of difference*), kako bi promjene nastale u određenom razdoblju bile čim vidljivije.

4.2. Laboratorijske metode

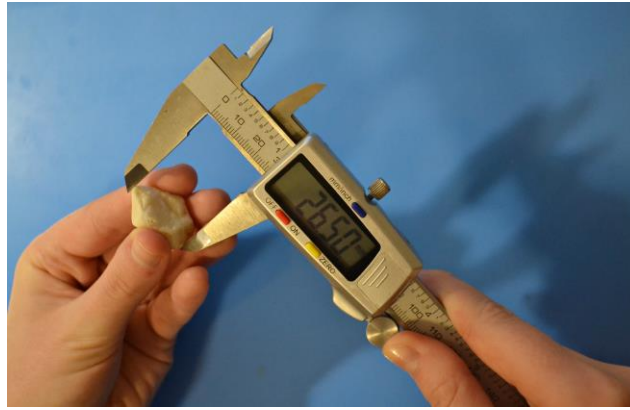
Veličina, sastav i morfologija su osnovne karakteristike zrna sedimenta, a u ovom radu određene su radi usporedbe s prirodnim sedimentom žala karakterističnim za šire istraživano područje. Odabir metode za određivanje veličine čestica odnosno granulometrijskog sastava ovisi o rasponu veličine čestica, stupnju konsolidacije sedimenta tj. sedimentne stijene i namjeni istraživanja.

Veličina zrna je temeljni element pri opisivanju sedimenata i sedimentnih stijena. To je odraz procesa trošenja i erozije, koji generiraju čestice različitih veličina i prirode transporta. Veličina čestica u sedimentima i sedimentnim stijenama kreće se u rasponu od nekoliko mikrometara (mikrona) do nekoliko metara. Prema najčešće korištenoj Udden-Wentworthovoj klasifikaciji temeljenoj na konstantnom omjeru dviju uzastopnih granica klasa, sedimenti su razvrstani u tri glavne kategorije: šljunak, pijesak i mulj. Mulj je razvrstan u frakciju gline i četiri frakcije praha, pijesak je razvrstan u pet frakcija, a šljunak u granule, valutice, oblutke i blokove.

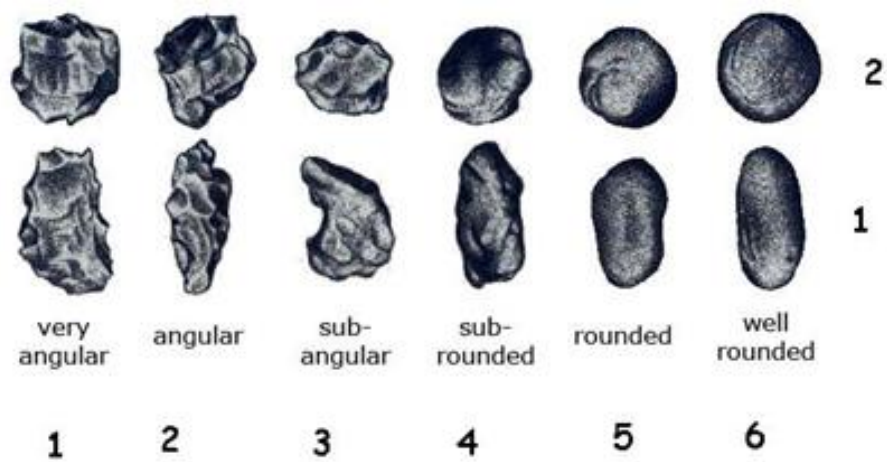
Morfologija zrna daje podatke o strukturno-teksturnim odlikama sedimenta. Odnosi se na oblik, sferičnost i zaobljenost zrna. Oblik zrna određuje se pomoću različitih omjera najdulje, srednje i najkraće osi. Na osnovi međusobnih odnosa srednje osi (I) i najdulje osi (L) te najkraće osi (S) i srednje osi (I) Zingg je (1935) kvantitativno definirao četiri osnovna tipa oblika zrna: diskoidalna, sferoidalna, pločasta i vretenasta zrna (Slika 24).

4.2.1. Izravno mjerenje pomičnim mjerilom

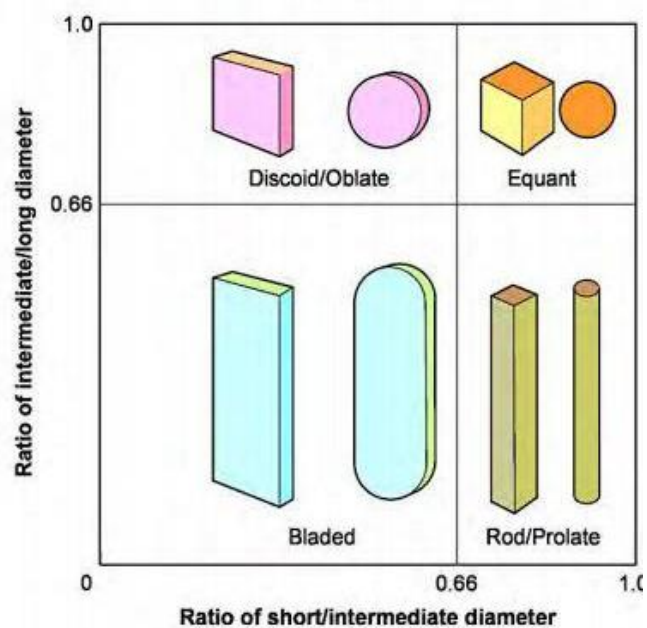
U ovom radu za analizu uzoraka korištena je metoda izravnog mjerenja kojom se u nekim uzorcima odredila srednja veličina zrna i oblik, a u drugima samo oblik (Slika 22). Korišteni su omjeri srednje i duge (I/L) i kratke i srednje (S/I) osi. Njihovim su omjerima u Zinggovom (1935) dijagramu (Slika 24) definirani oblici mjerenih čestica. Sferičnost i zaobljenost zrna definirane su i vizualno prema predlošku koji je dao Powers (1953), pri čemu je zaobljenost zrna svrstana u kategorije od 1 (vrlo uglato) do 6 (vrlo zaobljeno), a sferičnost u kategorije 1 (niska sferičnost) i 2 (visoka sferičnost) (Slika 23).



Slika 22. Izravno mjerenje pomoću digitalnog pomičnog mjerila.



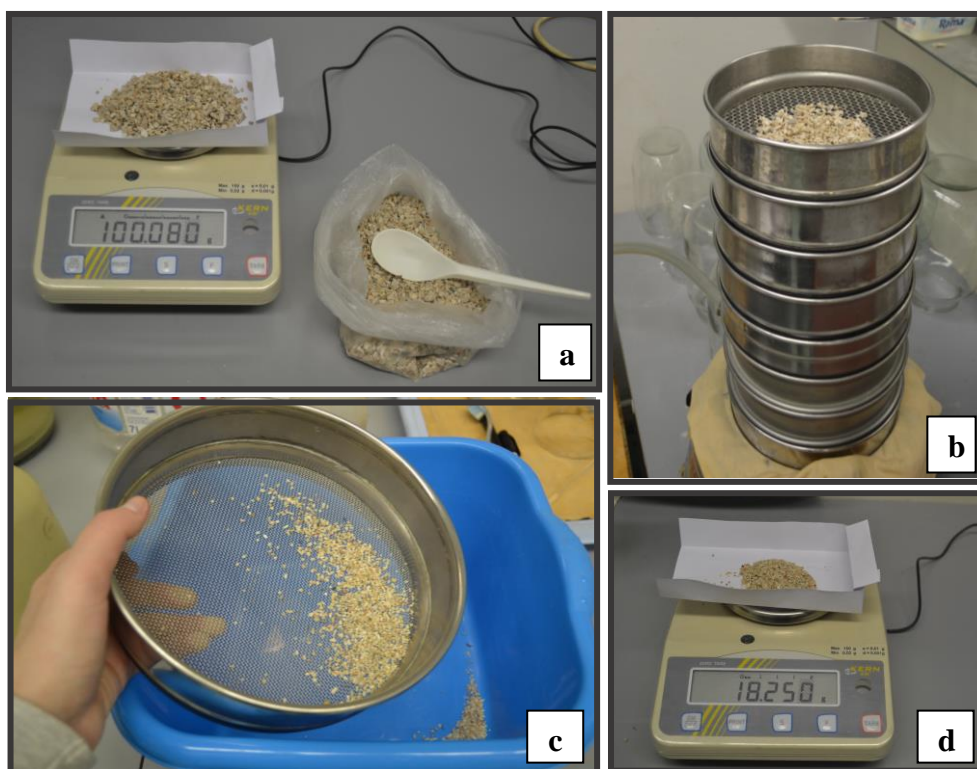
Slika 23. Grafički prikaz za vizualno određivanje stupnja sferičnosti i zaobljenosti zrna (Powers, 1953).



Slika 24. Grafički prikaz za određivanje oblika zrna (Zingg, 1935).

4.2.2. Suho sijanje

Sijanje je jedna od često korištenih metoda određivanja veličine zrna srednjozrnatih klastičnih sedimenata. Uzorak se sije kroz željeni broj sita tako da se razdijeli u više frakcija. Frakcijom se naziva dio uzorka koji se nakon sijanja zadrži između dvaju susjednih sita, tj. onaj dio uzorka koji sadrži zrna kojih su dimenzije ograničene dimenzijama otvora donjeg sita. Sijanje se može obavljati rupičastim, pletenim ili laboratorijskim sitima i mikrositima, što ovisi o rasponu veličina zrna uzorka (Tišljar, 1994). Kod suhog postupka uzima se prethodno izvagana količina materijala, odnosno reprezentativni uzorak (veličina uzorka ovisi o vrsti materijala i veličini zrna) (Slika 25). Uzorak se usipa na najgrublje sito u nizu sita (koja su postavljena jedno iznad drugog) u tresilicu. Nakon toga mjeri se masa frakcije zaostale na pojedinom situ.



Slika 25. Postupak suhog sijanja: a) vaganje reprezentativnog uzorka; b) trešnja sita na mehaničkoj tresilici; c) frakcija zaostala na situ d) vaganje frakcije.

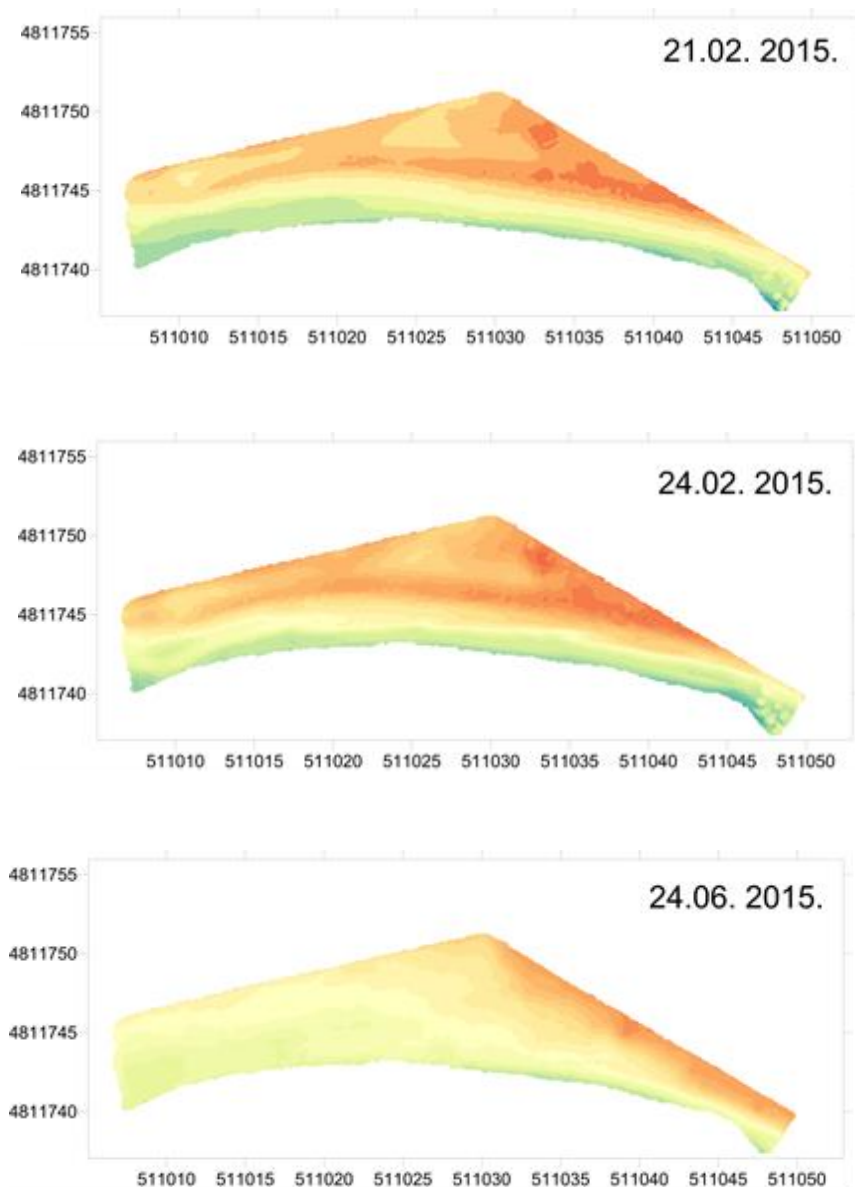
4.2.3. Kombinirana granulometrijska analiza suhim sijanjem i izravnim mjerenjem

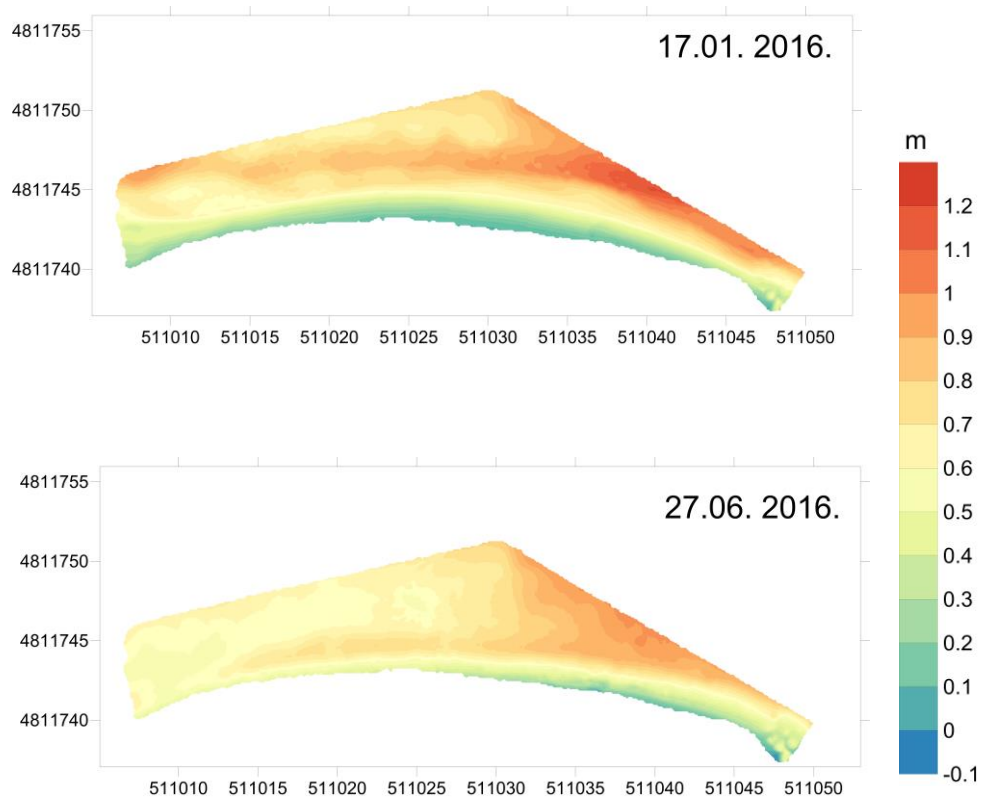
Za određivanje veličine zrna, pomoću pomičnog mjerila mjerene su međusobno okomite najdulja (L), srednja (I) i najkraća os (S) zrna. Također, svako je zrno izvagano na digitalnoj vagi. Raspodjela veličine zrna temeljena je na duljini srednje osi, koja određuje da li bi čestica prošla kroz mrežu sita dane veličine, čime ovakvo mjerenje daje rezultate koji su najusporedljiviji s klasičnim sijanjem (Sime, 2003; Collins, 2007). Metoda suhog sijanja izvedena je korištenjem sita sljedećih frakcija: 63 μm , 125 μm , 250 μm , 500 μm , 1000 μm , 2000 μm i 4000 μm . Dobiveni podaci obrađeni su pomoću statističkog programa GRADISTAT (Blott i Pye, 2001) čime su statistički opisane granulometrijske karakteristike sedimenta: srednja veličina zrna, prosječna veličina zrna, sortiranoost, asimetričnost krivulje i zaravnjenost krivulje. Svi parametri su definirani prema originalnim logaritamskim grafičkim mjerama koje su dali Folk i Ward (1975).

5. REZULTATI

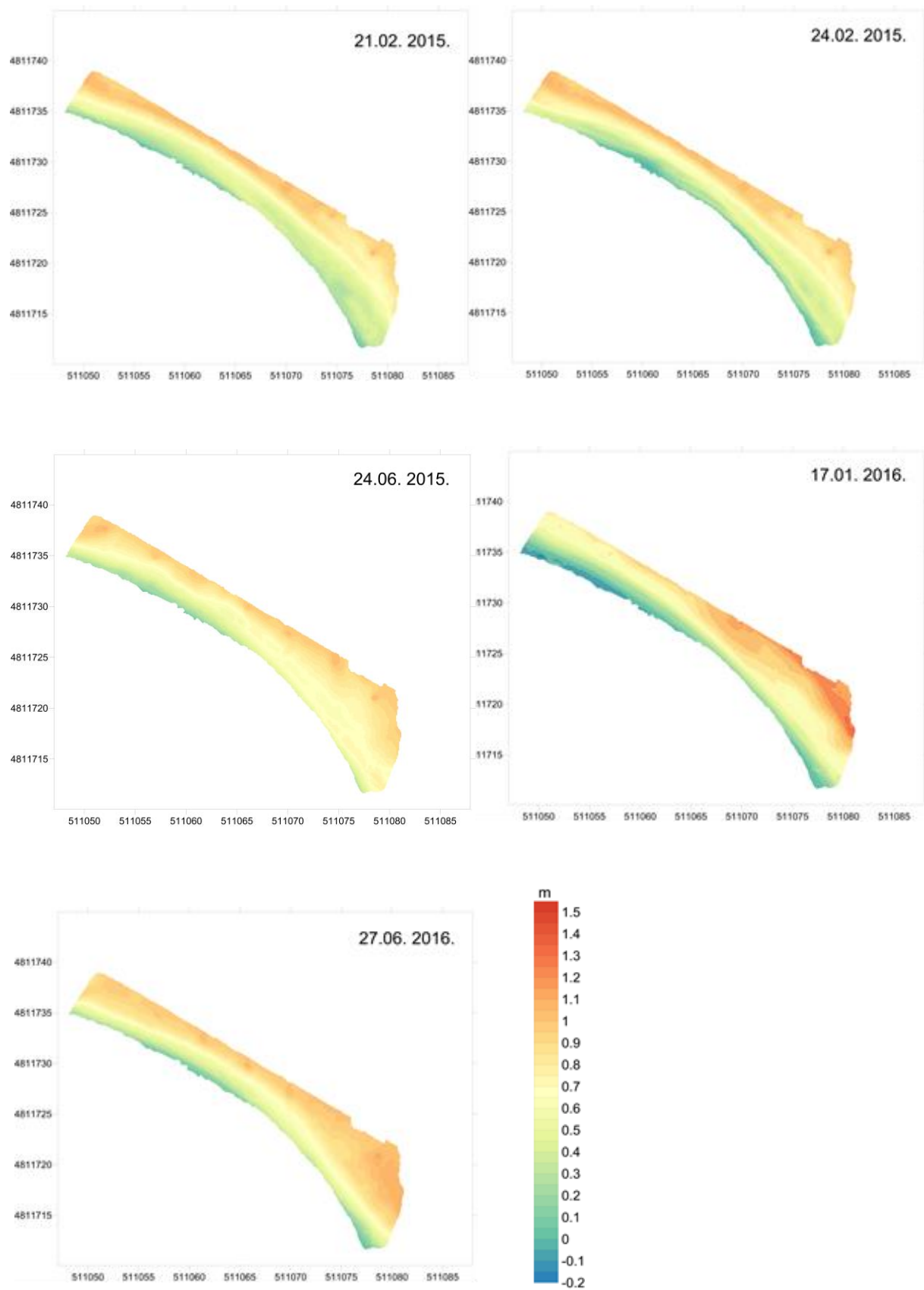
5.1. Razlike u morfologiji i volumenu žala

Metodom SfM fotogrametrije dobiveni su DEM-ovi (*digital elevation models*) za sjeverni (Slika 26) i južni dio žala Dugi Rat (Slika 27). Na modelima sjeverne strane žala (Slika 26) snimanih prije i poslije valova juga (21.02.2015.-24.02.-2015.) primjetljiva je razlika u visini žala i to u dijelu uz more. Sličan model dobiven je i tijekom siječnja 2016., dok oba ljetna modela sjeverenog dijela žala pokazuju manju razliku u morfologiji. Slična situacija primijećena je i na modelima južne strane žala (Slika 27). Kako bi razlike bile uočljivije, potrebno je pogledati modele razlike.





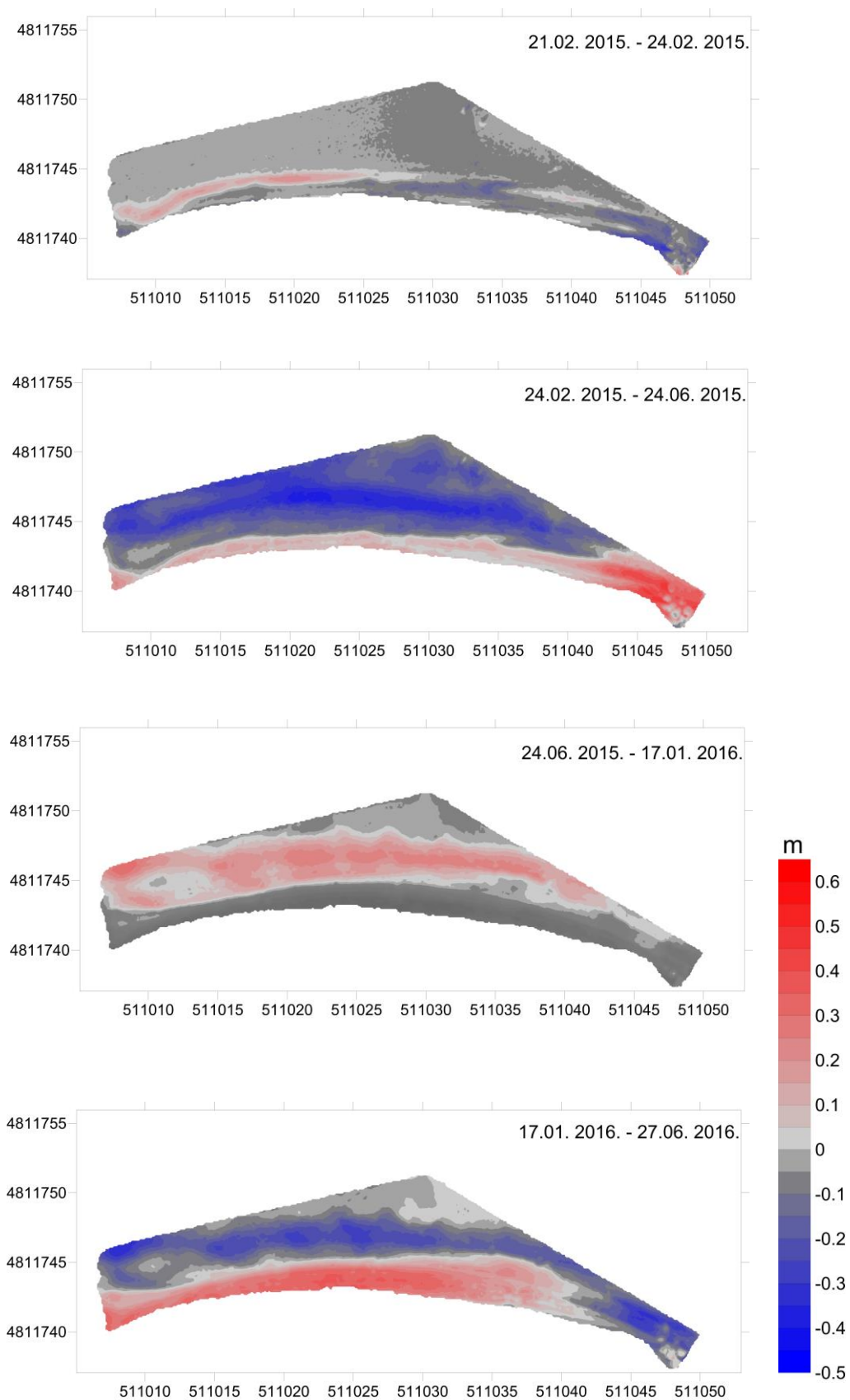
Slika 26. Digitalni elevacijski modeli **sjevernog** dijela žala.



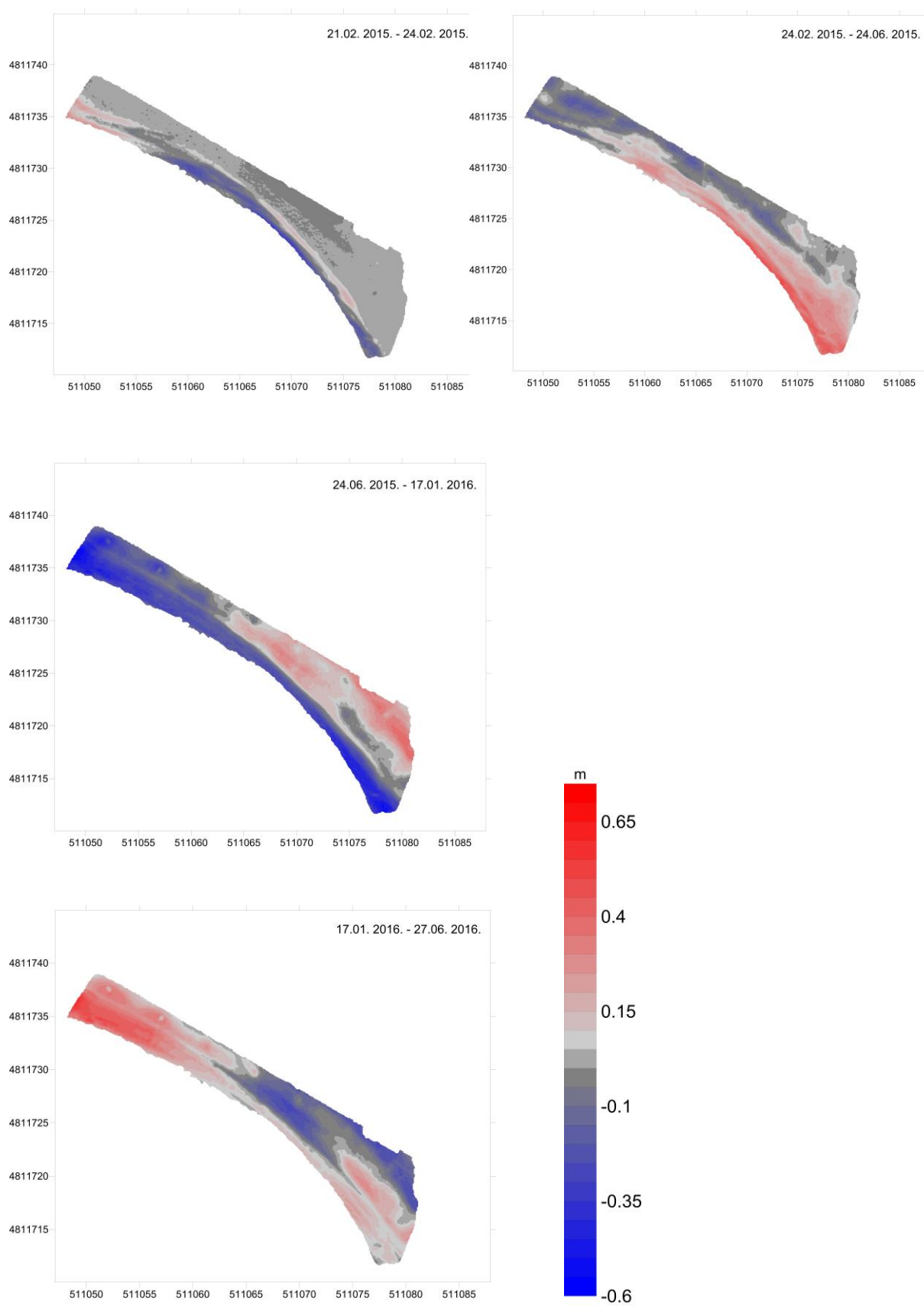
Slika 27. Digitalni elevacijski modeli **južnog** dijela žala.

Razlikovni model za oba dijela žala poslije olujnih valova juga pokazuje eroziju u jugoistočnom dijelu, dok je akumulacija materijala primijećena u njihovom sjeverozapadnom dijelu (Slika 28 i 29). Razlikovni modeli na sjevernom dijelu žala za razdoblje od veljače do lipnja 2015., kao i od siječnja do lipnja 2016. pokazuju generalno istu tendenciju: generalnu akumulaciju u uskom dijelu u dodiru s morem i generalni gubitak materijala u dijelu žala udaljenijem od mora. Obrnuti trend primijećen je za razdoblje od lipnja 2015. do siječnja 2016. (Slika 28).

Kod južnog dijela žala primjetna je razlika nakupljenog materijala u razdoblje od veljače do lipnja 2015., kao i od siječnja do lipnja 2016., s tim da je kod posljednjeg primijećen trend dužobalnog transporta prema betonskom molu (Slika 29). U razdoblju od lipnja 2015. do siječnja 2016. primijećen je trend gubitka sa žala (Slika 29).



Slika 28. Prikaz razlika u gubitku i prihranjivanju **sjevernog** dijela žala za navedena razdoblja.



Slika 29. Prikaz razlika u gubitku i prihranjivanju **južnog** dijela žala za navedena razdoblja.

U Tablici 1 nalaze se rezultati izmjere volumena sedimenta na oba dijela žala. Na sjevernom djelu žala zabilježen je mali porast njegovog volumena nakon djelovanja olujnih valova juga u razmaku od 3 dana, dok na južnom djelu nisu vidljive značajnije promjene volumena. Generalno, volumen sjevernog dijela žala je nešto veći u hladnijem dijelu godine, dok podaci za južni dio pokazuju suprotan trend (Tablica 1).

Tablica 1. Volumen sedimenta na žalu.

Datum	Sjeverni dio (DRN)	Južni dio (DRS)	Ukupni volumen (m³)
	Volumen (m³)		
21.02.2015.	168,57	123,08	291,65
24.02.2015.	170,29	123,57	293,86
24.06.2015.	152,05	139,32	291,37
17.01.2016.	159,71	128,71	288,42
27.06.2016.	157,79	145,85	303,64

5.2. Granulometrijska analiza

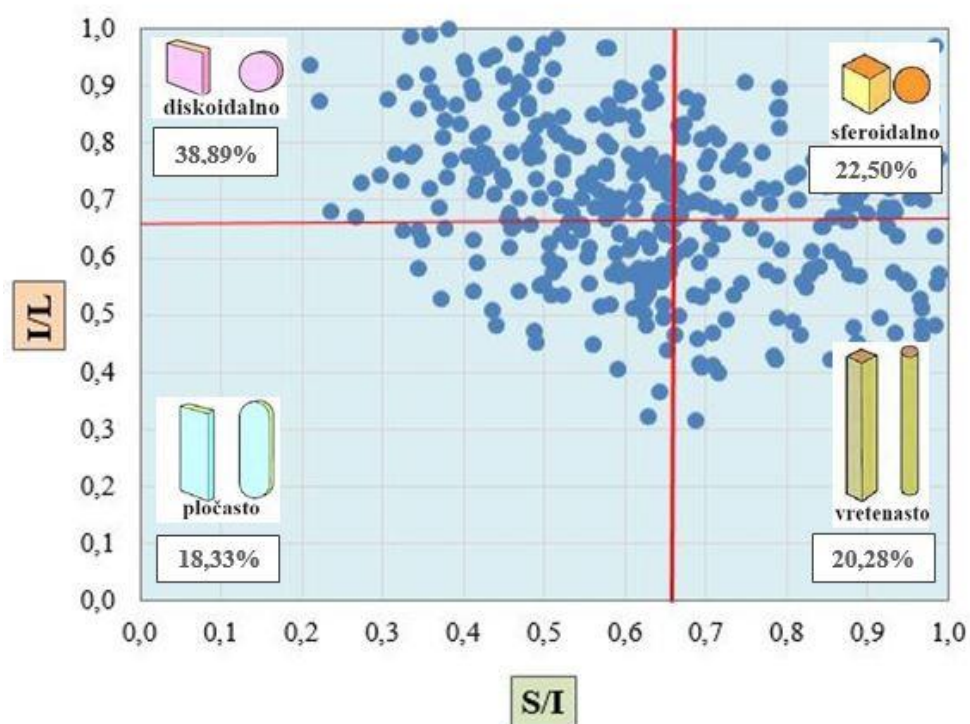
Na temelju granulometrijske analize za svaki uzorak dobiveni su rezultati o tipu sedimenta, srednjoj veličini zrna (Md), prosječnoj veličini zrna (Mz), sortiranosti sedimenta (So), asimetričnosti (Sk) i zaoštrenosti krivulje (Kg) (Tablica 2).

Tablica 2. Rezultati granulometrijske analize

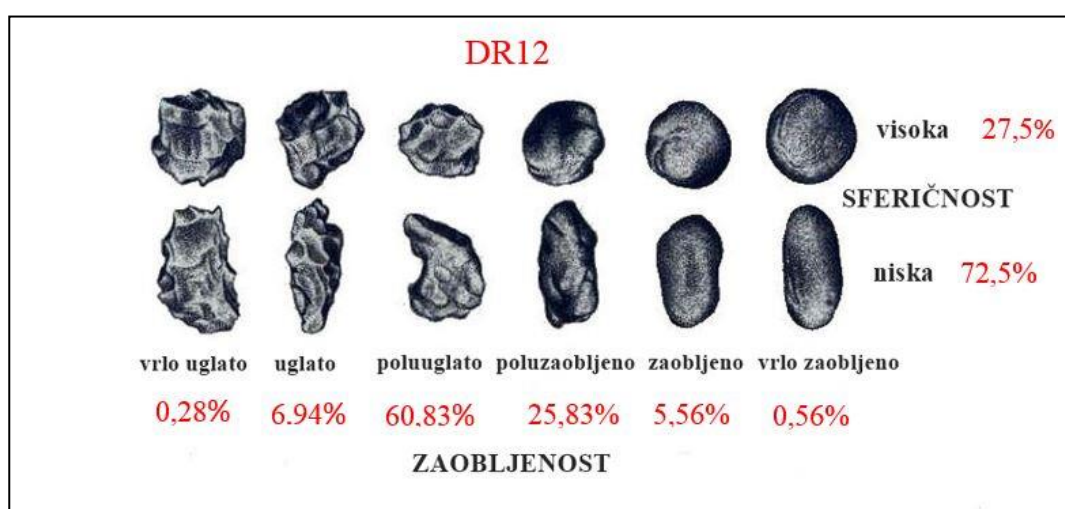
UZORAK	TIP SEDIMENTA	GRANULOMETRIJSKI PARAMETRI						
		Md		Mz		So	Sk	Kg
		ϕ	mm	ϕ	mm	ϕ	ϕ	ϕ
DR 12	Srednji šljunak	-3,85	14,46	-3,89	14,80	0,65 umjereno dobra	-0,04	0,79
DR 13	Sitni šljunak	-2,11	4,33	-2,06	4,17	0,62 umjereno dobra	0,12	0,75
DR 14	Srednji šljunak	-3,31	9,9	-3,34	10,12	0,87 umjerena	-0,08	0,84
DR 15	Krupni šljunak	-4,6	24,2	-4,65	25,07	0,51 umjereno dobra	-0,24	1,1
DR 16	Vrlo sitni šljunak	-1,54	2,90	-1,57	2,97	0,64 umjereno dobra	-0,04	1,33
DR 17	Srednji šljunak	-3,24	10,94	-3,18	9,09	0,73 umjerena	0,02	0,92
DR 18	Pjeskoviti sitni šljunak	-0,90	1,87	-0,78	1,72	1,50 slaba	0,14	0,81

U uzorku DR 12 metodom izravnog mjerenja pomičnim mjerilom izmjereno je 360 zrna. Sediment je klasificiran kao srednji šljunak. Srednja veličina zrna (Md) iznosi 14,5 mm, a prosječna veličina zrna (Mz) 14,8 mm (Tablica 2). Sortiranost sedimenta je sa 0,65 ϕ određena kao umjereno dobra (Tablica 2). Oblik zrna koji prema Zinggu (1935) dominira u uzorku je diskoidal (Slika 30). Prema Powersu (1953) s obzirom na zaobljenost i sferičnost, prevladavaju poluuglata zrna niske sferičnosti (Slika 31). Koeficijent asimetričnosti ukazuje na relativno simetričnu raspodjelu čestica, a koeficijent zaoštrenosti da je krivulja zaravnjena.

DR 12

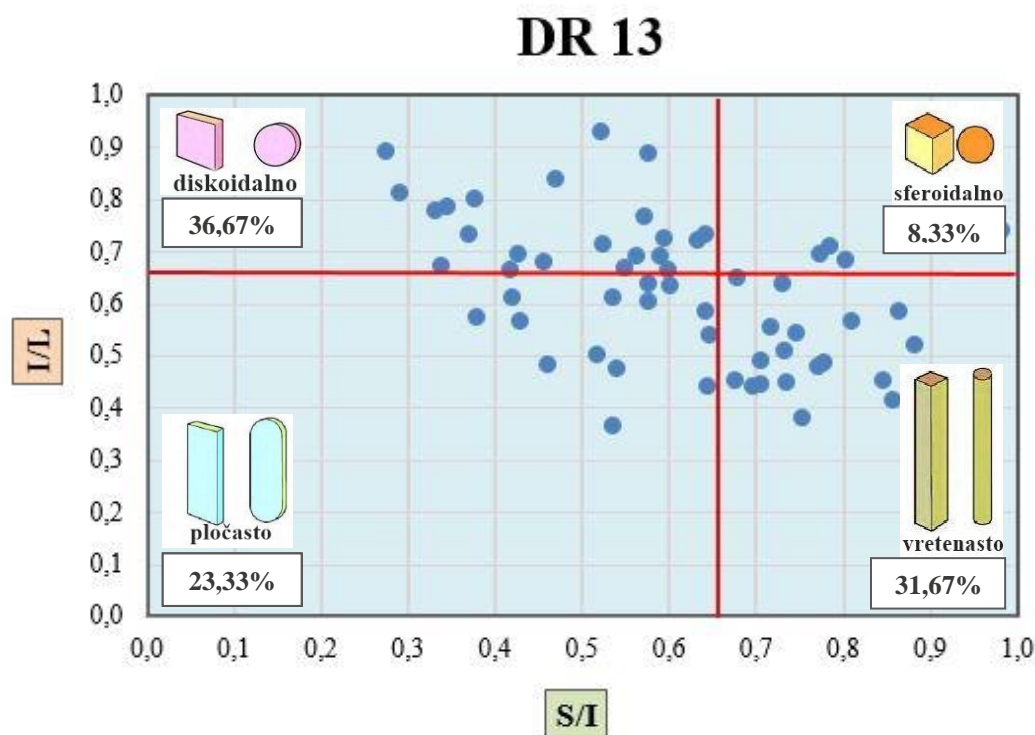


Slika 30. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 12.

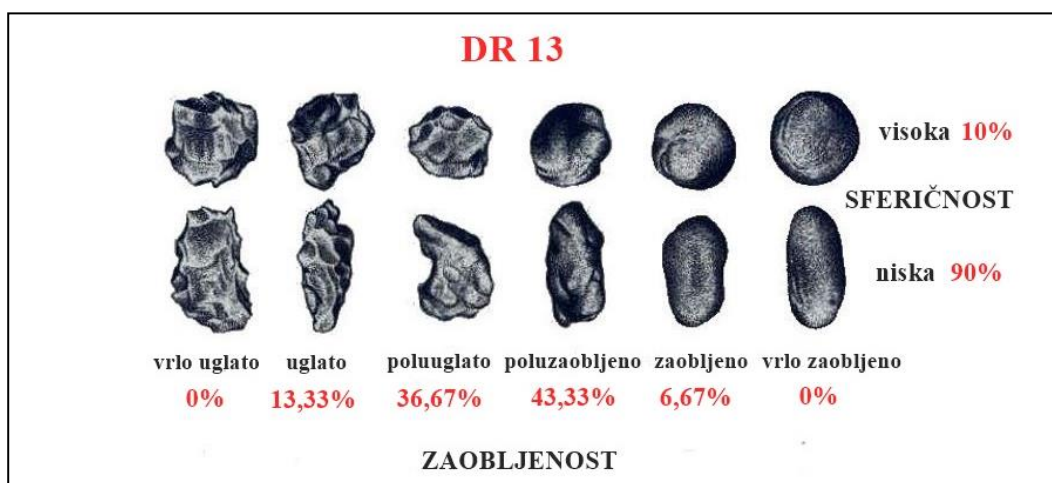


Slika 31. Grafički prikaz udjela zaobljenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 12.

Rezultati granulometrijske analize uzorka DR 13 dobiveni su kombinacijom metode suhog sijanja 100 g reprezentativnog uzorka i izravnog mjerenja 60 zrna. Sediment je klasificiran kao vrlo sitni šljunak sa srednjom veličinom zrna od 4,3 mm i prosječnom veličinom zrna od 4,2 mm (Tablica 2). Sortiranost sedimenta je umjereno dobra, a prema obliku prevladavaju diskoidalna i vretenasta zrna (Slika 32). Zaobljenost i sferičnost procijenjene su vizualno izravnim mjerenjem 60 zrna i rezultat mjerenja pokazuje dominaciju poluzaobljenih i poluuglatih zrna niske sferičnosti (Slika 33). Koeficijent asimetričnosti ukazuje na simetričnu raspodjelu čestica, a koeficijent zaoštrenosti da je krivulja vrlo zaravnjena.

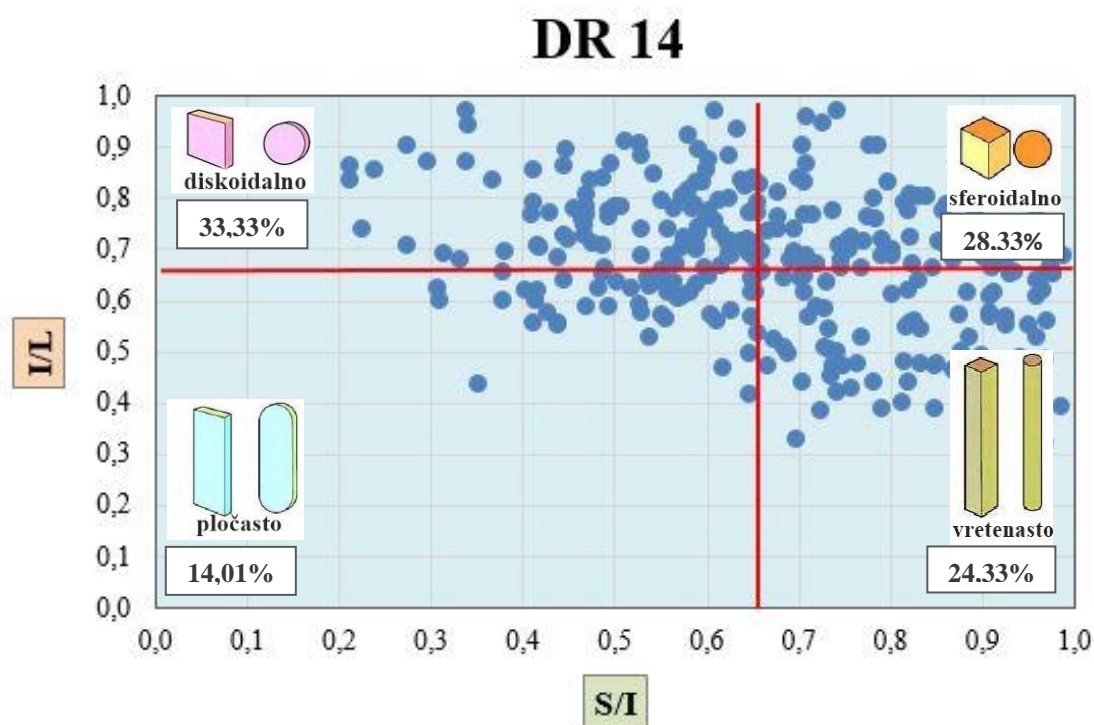


Slika 32. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 13.

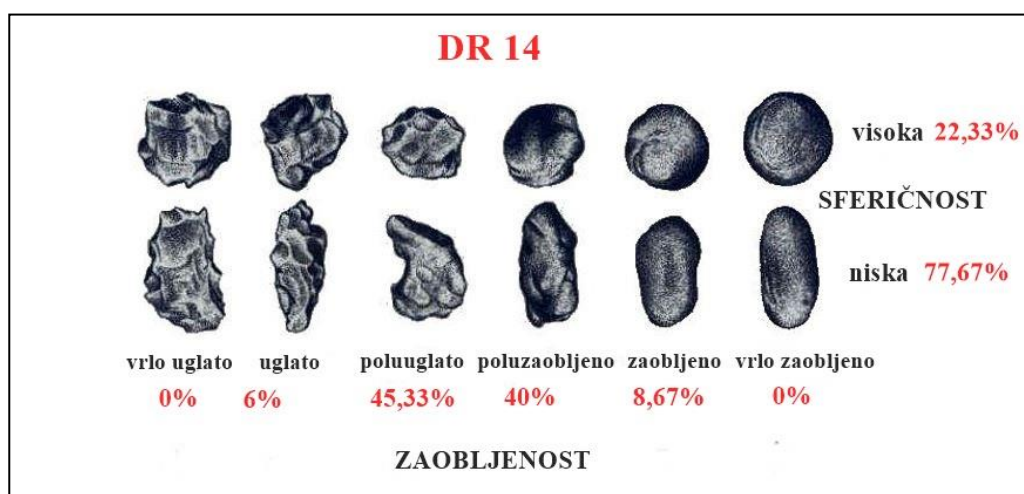


Slika 33. Grafički prikaz udjela zaobljenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 13.

Rezultati uzorka DR 14 dobiveni su izravnim mjerenjem 300 zrna. Sediment je klasificiran kao srednji šljunak srednje veličine zrna od 9,9 mm i prosječne veličine zrna od 10,12 mm (Tablica 2). Sortiranost je umjerena sa 0,87 ϕ (Tablica 2) te prevladavaju poluuglata i poluzaobljena zrna niske sferičnosti (Slika 35). Prema obliku zrna u ovom uzorku prevladava diskoidalni i sferoidalni oblik (Slika 34). Koeficijent asimetrije ukazuje da je raspodjela čestica gotovo simetrična, a koeficijent zaoštrenosti da je krivulja zaravnjena.

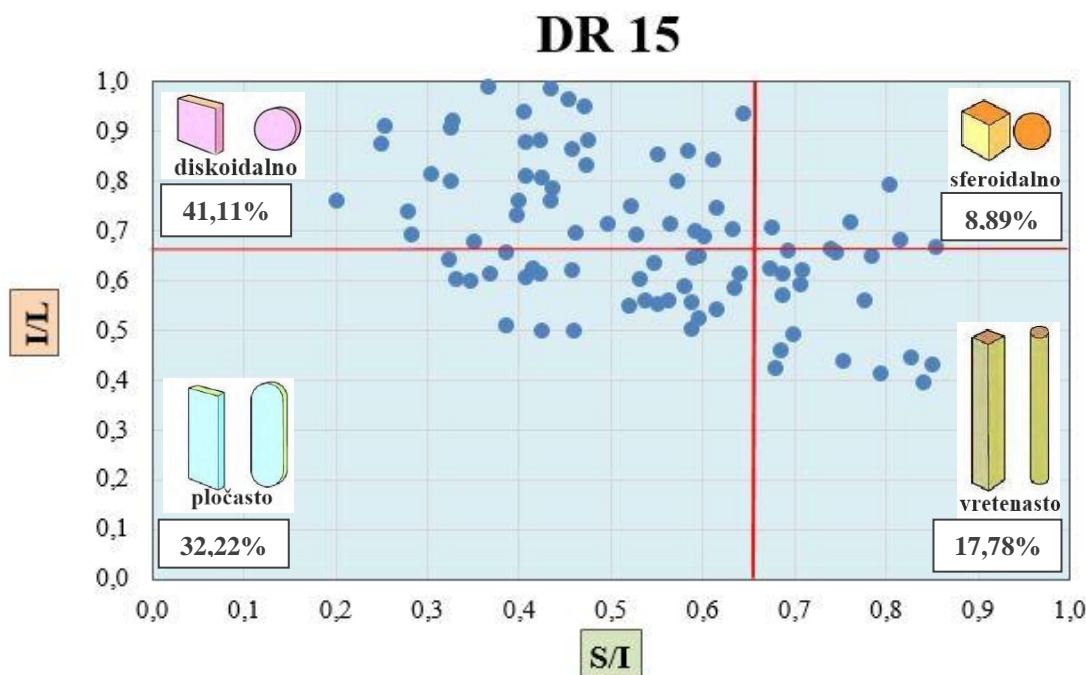


Slika 34. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 14.

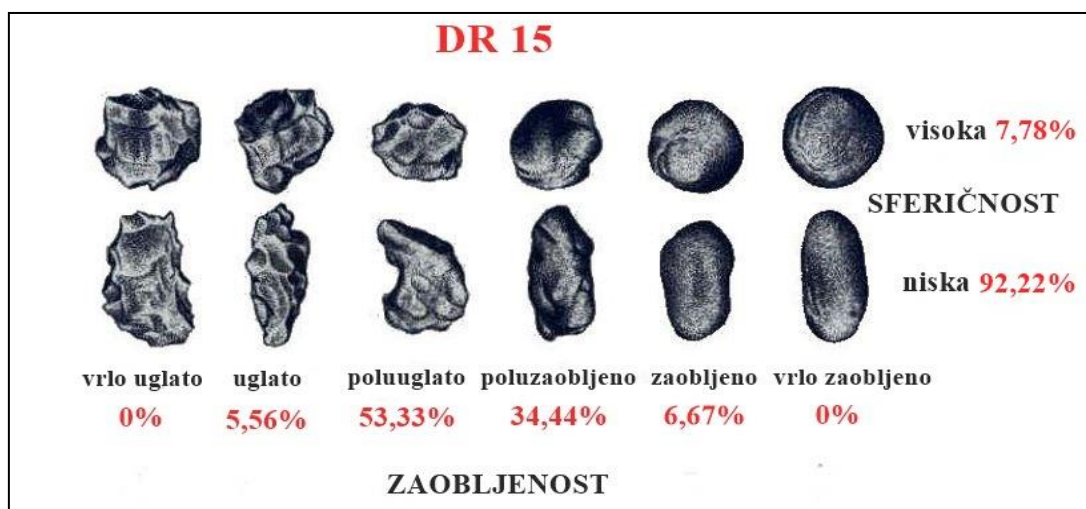


Slika 35. Grafički prikaz udjela zaoštrenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 14.

Na uzorku DR 15 primijenjena je također metoda izravnog mjerenja pri čemu je izmjereno 90 zrna. Rezultati pokazuju da se radi o krupnom šljunku s prosječnom veličinom zrna od 25 mm i srednjom veličinom zrna od 24 mm (Tablica 2). Prema obliku prevladavaju diskoidalna i pločasta zrna (Slika 36), a sortiranost je umjereno dobra sa 0,5 ϕ (Tablica 2). Zaobljenost i sferičnost zrna interpretirane su vizualno te rezultati pokazuju da prevladavaju poluuglata i poluzaobljena zrna niske sferičnosti (Slika 37). Koeficijent asimetrije ukazuje na vrlo negativno zakošenu krivulju dok je krivulja zaoštrenosti srednje zaoštrena.

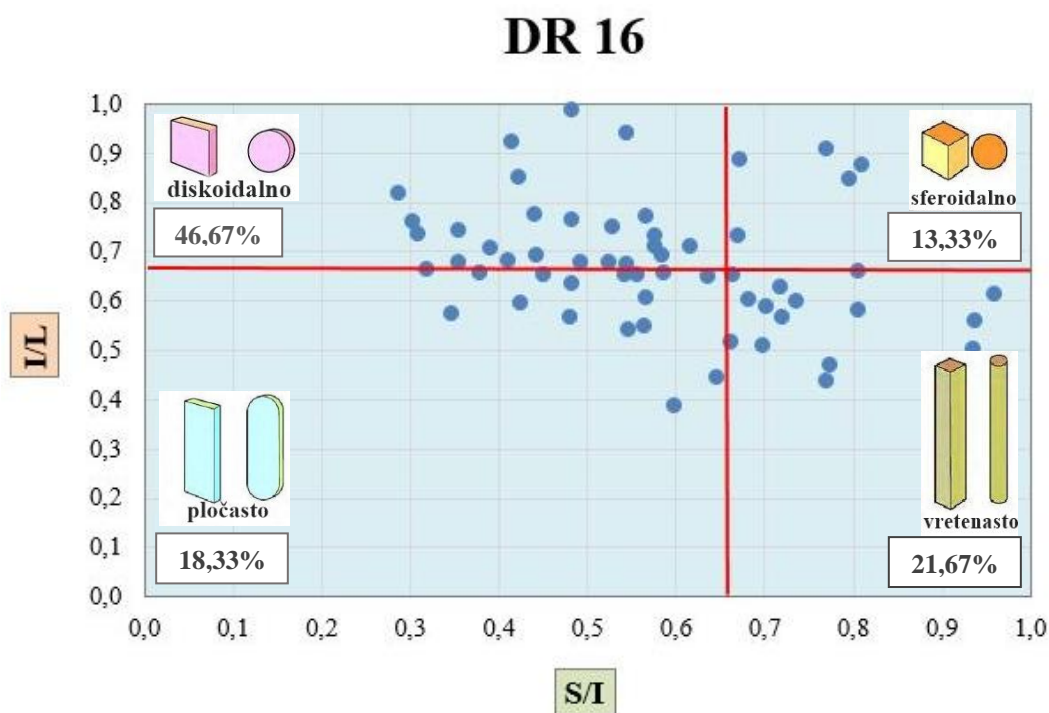


Slika 36. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 15.

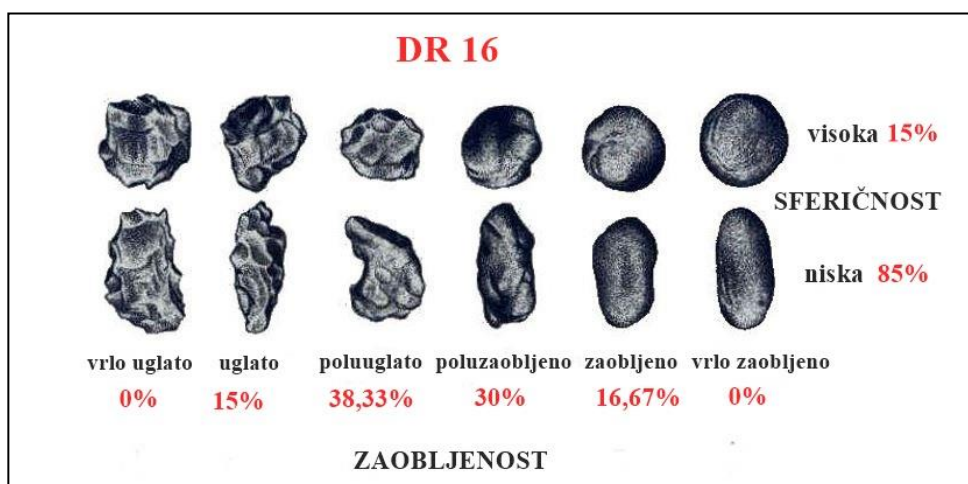


Slika 37. Grafički prikaz udjela zaobljenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 15.

Rezultati granulometrijske analize uzorka DR 16 dobiveni su kombinacijom metode suhog sijanja 100 g reprezentativnog uzorka i izravnog mjerenja 60 zrna. Sediment je klasificiran kao vrlo sitni šljunak s prosječnom veličinom zrna od 2,97 mm i srednjom veličinom zrna od 2,9 mm (Tablica 2). Sortiranost sedimenta je umjerena sa 0,64 ϕ (Tablica 2). Unutar reprezentativnog uzorka uočena je dominacija diskoidalnih zrna (Slika 38), a vizualno određivanje zaobljenosti i sferičnosti pokazuje dominaciju poluuglatih zrna niske sferičnosti (Slika 39). Koeficijent asimetrije ukazuje na vrlo negativno zakošenu krivulju, a prema koeficijentu zaoštrenosti krivulja je vrlo zaoštrena.

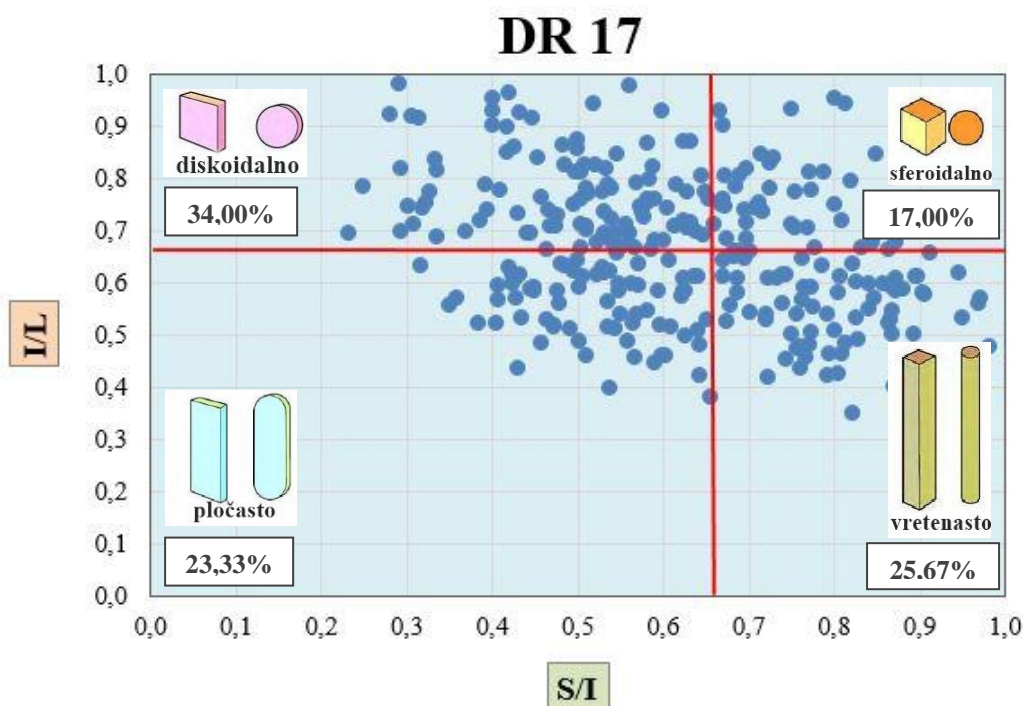


Slika 38. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 16.

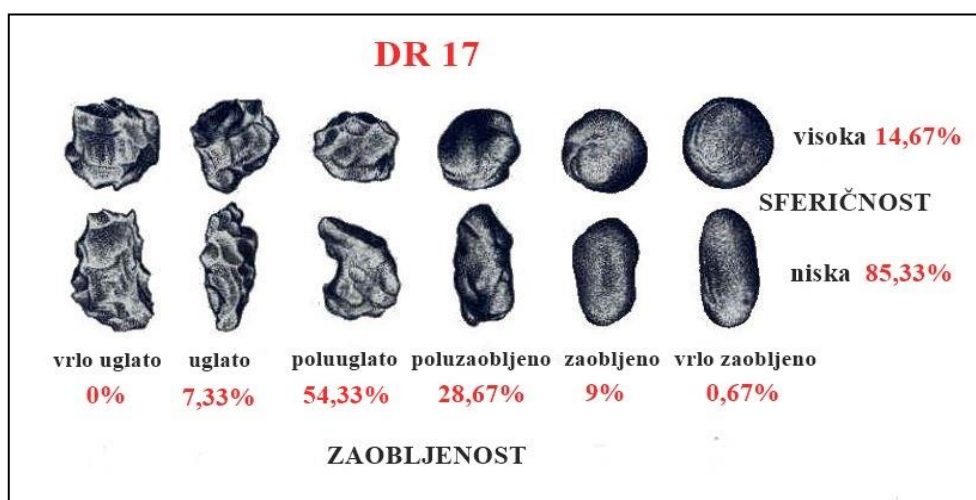


Slika 39. Grafički prikaz udjela zaobljenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 16.

Metodom izravnog mjerenja 300 zrna analiziran je i uzorak DR 17 te je sediment klasificiran kao srednji šljunak. Srednja veličina zrna je 10,9 mm dok je prosječna 9,09 mm (Tablica 2). Sortiranost je s vrijednošću 0,73 ϕ kategorizirana kao umjereno dobra (Tablica 2). Prema Zinggu (1935) dominiraju diskoidalna, pločasta i vretenasta zrna te s nešto manjim postotkom sferoidalni oblik zrna (Slika 40). Prema Powersu zrna su uglavnom poluuglata i niske sferičnosti (Slika 41). Krivulja asimetričnosti pokazuje gotovo simetričnu raspodjelu čestica, a krivulja zaoštrenosti je srednje zaoštrena.

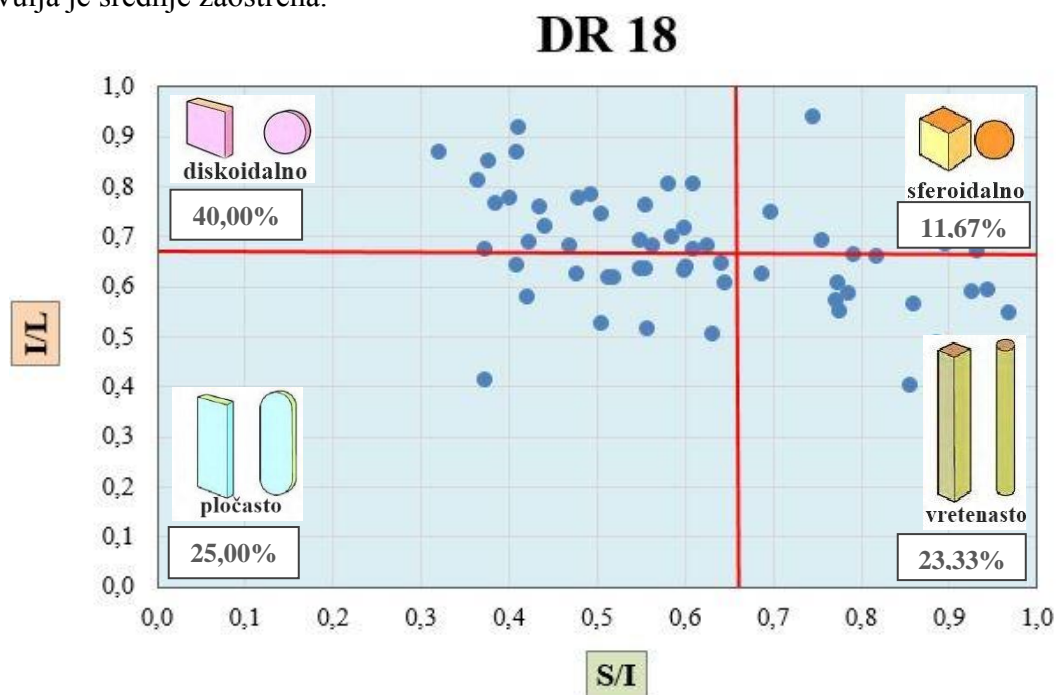


Slika 40. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 17.

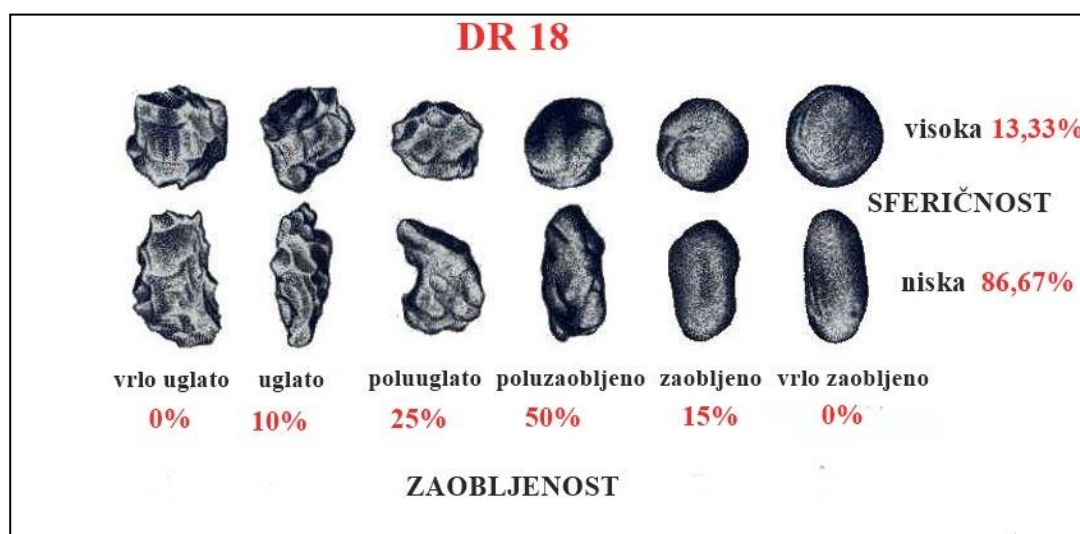


Slika 41. Grafički prikaz udjela zaoobljenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 17.

Rezultati uzorka DR 18 dobiveni su kombinacijom metode suhog sijanja 100 g reprezentativnog uzorka i izravnog mjerenja 60 zrna. Sediment je klasificiran kao pjeskoviti vrlo sitni šljunak sa srednjom veličinom zrna od 1,87 mm i prosječnom od 1,72 mm (Tablica 2). Sortiranost uzorka je slaba sa 1,5 ϕ (Tablica 2). Prema obliku prevladavaju diskoidalna zrna (Slika 42), a prema zaobljenosti i sferičnosti poluzaobljena zrna niske sferičnosti (Slika 43). Koeficijent asimetrije ukazuje na gotovo simetričnu krivulju, a prema koeficijentu zaoštrenosti krivulja je srednje zaoštrena.



Slika 42. Grafički prikaz udjela pojedinog oblika zrna u uzorku DR 18.



Slika 43. Grafički prikaz udjela zaobljenosti i sferičnosti zrna u uzorku DR 18.

6. RASPRAVA

6.1. Razlike u morfologiji i volumenu žala

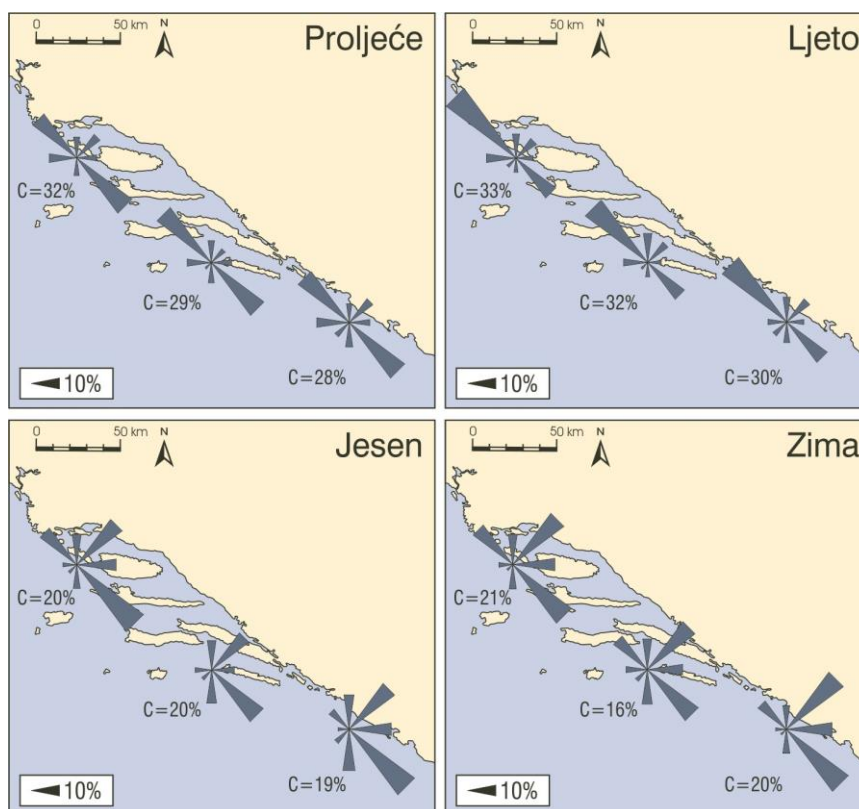
Prema rezultatima iz Tablice 1. vidljive su očekivane promjene volumena sjevernog i južnog dijela žala u zimskom i ljetnom periodu. Razlika u volumenu na oba dijela, nakon djelovanja valova pod utjecajem juga iznosi do 2 m^3 . S obzirom da se radi o periodu „kraja“ oluja uočena je gotovo neznatna razlika u gubitku materijala na južnoj strani (Slika 29), no u morfologiji žala vrlo je dobro vidljiv efekt valova juga i transport materijala s njegovog jugoistočnog dijela i značajna akumulacija prije betonskog mola. Prilikom terenskog rada vidljivo povećanje volumena od samo 2 m^3 u sjevernom djelu može se pripisati akumuliranju erodiranog materijala s južnog dijela. Erozivni efekt valova juga i transport materijala vidljiv je i na sjevernom djelu žala (Slika 26).

U razdoblju od veljače do lipnja 2015. na sjevernom djelu žala uočena je povećana količina sedimenta uz more. To se djelomično može pripisati umjetnom prihranjivanju. U lokalnoj zajednici je primijećen generalni prijenos materijala s južne na sjevernu stranu žala, pa se kod prihranjivanja zapunjavaju samo ona mjesta sjevernog dijela žala na kojima je erozija najprimjetnija, a to je neposredno nakon betonskog mola (Slika 26). Plavi dio na modelu ukazuje na prostor koji je prilikom nasipavanja u travnju vrlo vjerojatno zaravnjen kako bi se žalo proširilo za nadolazeću turističku sezonu (Slika 27) pa otuda kumulativni efekt erozije. Na južnoj strani je u istom razdoblju također vidljiv porast volumena, (Slika 29), ali očekivano u njegovom najjužnijem djelu, gdje je u znatno velikoj količini provedeno nasipavanje područja koji je tijekom zimskog perioda pod utjecajem erozije. S obzirom da valovi juga dolaze sa JI, erozijski procesi najprije „zahvaćaju“ najjužniji dio žala pa otuda i potreba za najvećom količinom nasipnog materijala upravo na njegovom najjužnijem djelu.

Sljedeći period za koji je dobivena razlika u volumenu je lipanj 2015. do siječanj 2016. Dakle radi se o periodu u kojem se pored prirodnih procesa mora u obzir uzeti i činjenica da je to vrijeme turističke sezone. Razlike na oba dijela žala ne mogu biti jednoznačno opisane, jer je žalo pod izrazitim utjecajem čovjeka u trajanju od minimalno tri mjeseca. Takva dugotrajna antropoturbacija uključuje osim kupališnih aktivnosti također i izvlačenje brodica na žalo, svakodnevno premiještanje opreme ugostiteljskog objekta (stolaca i stolova, rekvizita za djecu...), što rezultira neprekidnim „uznemiravanjem“ sedimenta. Ipak, ono što je moguće primijetiti na oba dijela žala je generalni trend gubitka sedimenta neposredno uz more. Promjena volumena za navedeno razdoblje (Tablica 1) ukazuje da je bez obzira na antropoturbaciju na oba dijela žala

prisutan trend dužobalnog transporta s južnog na sjeverni dio. Kao rezultat, na sjevernom djelu vidljiv je prirast (Slika 27) kao kumulativni rezultat nasipavanja i donos erodiranog materijala s južnog dijela. Još jedan mogući razlog takvog prirasta u sjevernom djelu su valovi maestrala koji pušu iz smjera sjeverozapada tijekom ljetnih mjeseci. Oni se pojavljuju na dnevnoj razini u popodnevним satima, kada je dnevni utjecaj čovjeka slabiji.

Zadnji vremenski period praćenja promjena na žalu je siječanj 2016. do lipanj 2016. U tom se periodu može uočiti slična situacija kao u istom razdoblju u prethodnoj godini, a radi se o prijenosu materijala s južnog na sjeverni dio. Povećan ukupni volumen cijelog žala u odnosu na prethodna razdoblja (Tablica 1) pripisuje se nasipavanju i to prvenstveno južnih djelova. Drugi efekt je zaravnjavanje sjevernog dijela i generalna akumulacija na njemu u području intertajdala. Promatranje promjena volumena i morfologije na žalu Dugi Rat pokazalo je da je tijekom cijele godine na žalu dominantan proces dužobalnog prijenosa sedimenta i to s njegovog južnog na sjeverni dio. To upućuje na dominaciju valova koji dolaze s jugoistoka. Ovakav podatak u skladu je s dominacijom puhanja juga u Srednjoj Dalmaciji na godišnjoj razini (HHI, 2002) (Slika 44). Ukupna promjena volumena žala u istraživanom razdoblju varira između 288 i 303 m³ sedimenta (Tablica 1).



Slika 44. Prikaz učestalosti valova generiranih vjetrovima različitih smjerova (HHI, 2002).

6.2. Granulometrijska analiza

Žalo Dugi Rat nasipava se drobljenim vapnencem iz kamenoloma na Mosoru, tzv. kamenim agregatom čiji raspon veličine zrna iznosi 4-8 mm. Kameni agregat se najčešće razdvaja u frakcije 0-4, 4-8, 8-16, 16-32, 32-63 i 63-125 mm. Pri industrijskom razdvajanju (sijanju) frakcije nije moguće u potpunosti razdvojiti pa svaka frakcija sadrži određenu količinu susjedne frakcije, s tim da ne smije sadržavati više od 10% manjih zrna, ni više od 15% većih zrna (Krstulović, 2000). Kod kamenih agregata frakcija 0-4 se naziva „nulom“, frakcija 4-8 mm „dvojkom“, frakcija 8-16 mm „trojkom“, a frakcija 16-32 mm „četvorkom“. Prema tome, žalo Dugi Rat nasipava se dvojkom. Rezultati granulometrijske analize pokazuju da raspon srednje veličine zrna u uzorcima DR 12 - DR 18 iznosi 2 - 24 mm (Tablica 2) što znači da je raspon veličine zrna širi od raspona materijala kojim se žalo nasipava. Izvor krupnijih i sitnijih zrna unutar frakcije dvojke može se objasniti na dva načina.

Prvo, s obzirom da svaka frakcija, u ovom slučaju dvojka može sadržavati do 10, odnosno 15% manje i veće frakcije velika je vjerojatnost da je to razlog dobivenih rezultata granulometrijskom analizom. S druge strane, izvor krupnijih zrna u analiziranom sedimentu može biti trošenje podloge žala, koja je bila napravljena od krupnozrnatijeg kršja, dok je sitnozrnati sediment (do 0,063 mm) vrlo vjerojatno djelomično nastao trošenjem zrna tijekom obalnih procesa.

Rezultati vizualne procijene visoke sferičnosti u svim se uzorcima poklapaju, do 5-10% razlike s postotkom sferoidalnog oblika zrna unutar uzoraka, dobivenih pomoću Zinggovog dijagrama (Slika 24). Nadalje, od ostalih oblika zrna prema Zinggu (1935) gotovo u svim uzorcima najveće udjele zauzimaju diskoidalna i pločasta zrna. Uzrok tome može se tražiti u samoj početnoj fazi drobljenja vapnenaca. S obzirom da je za njih karakteristična slojevitost, može se zaključiti da kameni agregat nakon drobljenja donekle zadržava slojevitost. Kao rezultat toga zrna za nasipavanje u najvećem postotku imaju diskoidalan oblik.

Žala su okoliši u kojima je, ovisno o prevladavajućim valnim prilikama i prevladavajućoj dužobalnoj struji moguće pratiti gradaciju veličine zrna duž žala. U uzorcima DR 12 i DR 15 uzorkovanih u jugoistočnijim dijelovima žala (Slika 18) uočena je dominacija krupnijih zrna u odnosu na ostale uzorke. To se može pripisati pojačanoj eroziji odnosno odnošenju sitnozrnatijeg materijala, nakon čega na žalu zaostaje krupniji materijal. Oba uzorka su sakupljena sa dijelova žala na kojima je primijećena najjača erozija tijekom valova juga (Slika 18). Gledajući žalo u cjelini uočen je i prekid gradacije veličine zrna između mjesta uzorkovanja 14 i 15 (Slika 18).

Naime, na tom je mjestu sagrađen betonski mol koji remeti prirodnu cirkulaciju sedimenta. Zbog toga se u uzorku DR 14 koji je uzorkovan na južnom dijelu neposredno prije mola pojavljuju sitnije frakcije, a u uzorku DR 15 uzorkovanom nakon mola (Slika 18) ponovno pojavljuju krupnija zrna do srednje veličine od 2,4 cm (Tablica 2).

Sortiranost sedimenta u gotovo svim uzorcima pokazala se kao umjerena do umjereno dobra, dok je zadnji uzorak DR 18 analiziran kao slabo sortirani sediment (Tablica 2). DR 18, klasificiran je kao pjeskoviti vrlo sitni šljunak, a taj podatak ukazuje da uzorak sadrži više frakcija čija su zrna nejednoliko raspoređena što je rezultiralo slabom sortiranosti sedimenta. Ovakav rezultat je do određene mjere bio i očekivan. S obzirom da je taj dio žala zaštićen lukobranom (Slika 45), to je mjesto zaustavljanja sedimenta, kako originalno nasutog, tako i onog sitnozrnatijeg. Miješanje različitih veličina zrna daje u konačnici materijal sastavljen iz različitih veličinskih frakcija.



Slika 45. Prikaz nakupljenog materijala kod lukobrana.

U neposrednoj blizini žala Dugi Rat nalazi se nekoliko prirodnih žala s kojima je moguće usporediti rezultate dobivene ovom granulometrijskom analizom. Prirodno žalo Glavica za koje je poznata srednja veličina zrna od 3-10 cm (Pikelj i dr., 2014) nalazi se na samom izlazu iz Dugog Rata u smjeru Omiša. Uspoređujući navedene rezultate sa dobivenim rezultatima analiziranog sedimenta kod kojeg je srednja veličina zrna u rasponu od 0,89 do 2 cm (Tablica 2) očita je velika razlika. Na žalu Glavica je još uvijek više-manje prisutan prirodan sediment čiji je raspon veličina (3-10 cm) i vrlo visok postotak zaobljenih zrna posljedica djelovanja valova.

Najsitniji materijal na žalu Glavica je u prosjeku krupniji od najkrupnijeg materijala na žalu Dugi Rat. Pretpostavlja se da se iz tog razloga materijal na žalu Glavica uspješno zadržava i ne biva nepovratno izgubljen erozijom tijekom obalnih procesa.

Sjevernije od žala Dugi Rat nalazi se žalo Soline, građeno od prirodnog materijala. Iako ne postoje objavljeni podaci o njegovom granulometrijskom sastavu, pregledom sedimenta tijekom terenskog rada bilo je moguće uočiti njegova morfološka obilježja sedimenta. Kao i na žalu Glavica, sediment je na tom žalu znatno krupnozrnatiji u odnosu na materijal kojim se nasipava umjetno žalo Dugi Rat. Za razliku od žala Glavica, žalo Soline je orijentirano kao i žalo Dugi Rat, eksponirano prvenstveno valovima iz JI smjera. Tijekom olujnih perioda uočena je erozija i dužobalni transport, no s obzirom na činjenicu da se to žalo ne nasipava, očito je da je stabilno te za sad ne postoji potreba za brigom o njegovom opstanku. Takva stabilnost na žalu Soline pripisuje se prirodnoj veličini zrna sedimenta od kojeg je građeno.

Na temelju opisanih zapažanja moglo bi se zaključiti da je materijal na žalu Dugi Rat vjerojatno presitan za dane valne prilike i on se kad jednom bude odnešen u izuzetno malom postotku vraća na žalo. Otuda i potreba za stalnim nasipavanjem i prihranjivanjem žala. Kad je u pitanju nasipavanje, poznato je da je za svako žalo potrebno dizajnirati projekt nasipavanja (Finkl i Walker, 2002). On definira količinu materijala, zamišljenu konfiguraciju terena i vrijeme nasipavanja. Pri tome je u obzir potrebno uzeti prikladnost materijala što se tiče sastava i veličine zrna, kratkoročne i dugoročne valne i klimatske prilike, te u novije vrijeme i porast razine mora. Svaki projekt nasipavanja žala svakako treba uključivati praćenje novonastalog okoliša, kako bi se projekt mogao dalje usmjeravati i dorađivati. Još jedna od ključnih stvari kod nasipavanja je spriječiti negativan utjecaj na morski svijet ili na kopnena staništa koja mogu biti ugrožena tijekom nasipavanja.

Kako je već gore pokazano, sediment kojim se nasipava žalo Dugi Rat nije u potpunosti prikladan što se tiče veličine zrna. Prema dobivenim oskudnim informacijama, istraživano žalo se godišnje prihranjuje sa 50-70 m³ kamenog agregata. Promjena ukupnog volumena žala se malo razlikuje tijekom godine, odnosno za zadnje istraženo razdoblje (proljeće-ljeto 2016.) je svega 10 m³ veća u odnosu na prethodnih 6 mjeseci. To bi moglo ukazivati na brzi gubitak sedimenta neposredno nakon nasipavanja.

Kontinuirani gubitak sedimenta i njegovo odnošenje u dublje dijelove mora postavlja pitanje o ekološki prihvatljivom projektu. Slični projekti se provode duž cijele hrvatske obale (Pikelj i dr., 2013), što ukazuje na veliku potrebu za postavljanjem smjernica upravljanja žalima u Hrvatskoj, a time i upravljanja obalnom zonom.

7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog istraživanja i dobivenih rezultata može se utvrditi da je SfM fotogrametrija, iako još uvijek nedovoljno primjenjena na hrvatskim žalima upotrebljiva i financijski relativno isplativa. Naime, koristeći vrlo jednostavnu opremu za terenski rad te specijalizirane računalne programe, utvrđivanje varijabilnosti morfologije i volumena žala Dugi Rat uspješno je provedeno. Značajniji, ali manje više jednokratni financijski izdatak je oprema za geopozicioniranje i nabava računalnog programa.

Rezultati koji su dobiveni upotrebom SfM fotogrametrije i laboratorijskim metodama podudaraju se s općim znanjem o kretanju odnosno eroziji sedimenta na žalu. Prema dobivenim razlikama u prirastu i gubitku materijala tijekom zimskih i ljetnih mjeseci može se zaključiti da je dominacija juga tijekom godine, odnosno valovi juga, glavni čimbenik za stvaranje promjena u morfologiji i volumenu žala u istraženom području. Dobiveni rezultati pokazuju generalni trend djelovanja erozije tijekom olujnih perioda u južnom djelu žala, te akumulaciju u njegovom sjevernom djelu. U skladu s time, antropogeni utjecaj prepoznat je u „izazivanju“ obrnutog kretanja sedimenta na žalu od onog prirodnog.

U odnosu na srednje veličine zrna na prirodnim žalima Glavica (Pikelj i dr., 2014) i Soline, žalo Dugi Rat se nasipava neprikladnim materijalom što se tiče veličine zrna. Kao rezultat takvog neispravnog načina prihranjivanja, prirodno kretanje sedimenta odnosno kompletna dinamika žala poremećena je djelovanjem nepovratnih erozijskih procesa na žalu koji negativno utječu na njegov opstanak. Dugoročno, kontinuirana erozija i ponavljano nasipavanje su značajan financijski izdatak. Pored toga transport materijala u dublji dio mora vjerojatno ugrožava bentičke organizme, iako ne postoje istraživanja na tom području. Prema dobivenom, očito je da je projekt održavanja ovog žala potrebno redizajnirati, prvenstveno s aspekta promjene veličine zrna materijala kojim se nasipava. Osim toga, daljnji monitoring nakon redizajna bio bi nužan radi utvrđivanja prikladnosti uvedenih promjena.

Potreba za sustavnim upravljanjem, na hrvatskom djelu Jadranske obale očito postoji, no u tom je slučaju od iznimne važnosti odabrati ispravan način. Zaključno, žalo Dugi Rat samo je jedan primjer neispravnog pokušaja upravljanja žalima u Hrvatskoj.

8. LITERATURA

Almeida, L.P., Masselink, G., Russel, P.E., Davidson, M., Poate, T., Mccall, R., Blenkinsopp, C., Turner, I.L. (2013): Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner (Lidar). *Journal of Coastal Research*, 65, 636-641.

Anthony, E.J., (2005): Beach erosion. In: Schwartz, M.I., *Encyclopedia of coastal science*. The Netherlands: Springer Science & Business Media, str 140.

Basa L. i Juraj I. (2011): Oblak točaka i AutoCAD Civil 3D. *Ekscentar*, 14, 34-39, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Baučić, I., (2000): Položaj, priroda, stanovništvo i naselja. In: Općina Dugi Rat, Dugi Rat, Poglavarstvo općine Dugi Rat, 7-14.

Bento, M. F. (2008): Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Inside GNSS*, 54-61.

Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., Thiele, S.T., Bangash, H.A. (2014): Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, 163-178.

Bird, E.C.F. (1996): *Beach Management*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 23, 5, 281 str.

Blenkinsopp, C.E., Bracs, M.A., Turner, I.L., Peirson, W.L. (2010): Measurements of the time-varying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR. *Coastal Engineering*, 57(11), 1059-1065.

Blott, S. J. i Pye, K. (2001): GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.

Chandler, J. (1999): Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 51-63.

Collins, M., Lucey, K., Lambert, B., Kachmar, J., Turek, J., Hutchins, E., Purinton, T., Neils, D. (2007): Stream barrier removal monitoring guide. Gulf of Maine Council on the Marine Environment.

Dolan, R., Hayden, B.P., May, P., and May, S., (1980): The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4), 22-2.

Emery, K.O. (1961): A simple method of measuring beach profiles: *Limnology and Oceanography*, 6, str. 90-93.

Fairbridge, R.W. (ed.), (1968): *The Encyclopedia of Geomorphology*. New York: Reinhold Book, 1295str.

Finkl, C. W., Walker, H.J. (2002): Beach nourishment. U: Chen, J., Eisma, D., Hotta, K., Walker, H.J. (ur.): *Engineered coasts, Coastal systems and continental margin*, Volume 6, 1-22 str.

Folk, R.L., Ward, W.C. (1957): Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Sediment Petrol*, 27,3-26.

Govorčin, M., Kovačić, F., Žižić, I. (2012): Bepilotne letjelice SenseFly Swinglet CAM Ekscentar, 15, 62-68.

HHI, (2002). Peljar za male brodove, II. dio. Hrvatski hidrografski Institut, Split, 269 str.

Holman, R.A., Sallenger, A.H., Jr., Lippman, T.C. i Haines, W. (1993): The application of video image processing to the study of nearshore processes. *Oceanography* 6(3),78-85.

Hsu, J.R.C (2005): Engineering applications of coastal geomorphology. In: Schwartz, M.I., *Encyclopedia of coastal science*. The Netherlands: Springer Science & Business Media, str. 415.

James, M.R. i Robson, S. (2012): Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research*, 117, F03017.

James, M.R., Ilić, S. i Ružić, I. (2013): Measuring 3D coastal change with a digital camera. Coastal Dynamics, 893-903.

Jensen, J. (2000): Remote Sensing of the Environment, An Earth Resource Perspective. Upper Saddle River: Prentice Hall, str.3.

Juračić, M., Benac, Č., Pikelj, K. i Ilić, S. (2009): Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia). Geomorphology, 107, 90-99.

Kelletat, D.H. (2005): Dalmatian coasts. In: Schwartz, M. (ed.), Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 355–356.

Kolarek, M. (2010): Bepilotne letjelice za potrebe fotogrametrije. Ekscentar, br. 12, str. 70-73.

Komar, P.D. (1998): Beach Processes and Sedimentation. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2 edition, str. 544.

Korbar, T. (2009): Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates. Earth Science Reviews, 96(4), 296-312.

Kraus, N.C. (2005): Profiling, Beach, In: Schwartz, M.I., Encyclopedia of coastal science. The Netherlands: Springer Science & Business Media, str.781.

Kraus, N.C., Larson, M., i Wise, R.A., (1999): Depth of Closure in Beach-Fill Design. Proceedings 12th National Conference on Beach Preservation Technology, Tallahassee, Florida: Florida Shore & Beach Preservation Association, 271–286.

Krstulović, P. (2000): Svojstva i tehnologija betona. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 346 str.

Lužar-Oberiter, B. (2016/2017):

https://www.pmf.unizg.hr/download/repository/RPUG_P4_DaljinskaDetekcija_2016_17.pdf

Marinčić, S. (1981): Eocenski fliš jadranskog pojasa. *Geološki vjesnik*, 34, 27-38.

Marinčić, S., Korolija, B., Mamužić, P., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M. i Benček, Đ. (1976): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Omiš L33-22., Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1968-1969); Savezni geološki institut, Beograd.

Marinčić, S., Korolija, B., Mamužić, P., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M. i Benček, Đ. (1977): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Omiš L33-22., Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1968-1969); Savezni geološki institut, Beograd, 51 str.

McLaren, P., (1981): An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, 611-624.

Miller, P., Mills, J., Edwards, S., Bryan, P., Marsh, S., Hobbs, P. i Harvey Mitchell (2007): A robust surface matching technique for integrated monitoring of coastal geohazards, *Marine Geodesy*, 30 (1-2), 109-123.

Mocochain, L., Audra, P., Clauzon, G., Bellier, O., Bigot, J.Y., Parize, O. i Monteil, P. (2009): The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: example of the Lower Ardeche River (mid Rhone Valley). *Geomorphology*, 109(12), 46-61.

Morton, R.A., Leach, M.P., Paine, J.G., i Cardoza, M.A. (1993): Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 702-720.

Nieto, M. A., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G. A., Ortiz, A., Tintoré, J., Álvarez-Ellacuría, A., Gómez-Pujol, L. i Orfila, A. (2010): An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surf. Process. Landforms*, 35, 1712-1719.

Nordstrom, K.F., (1994): Developed coasts. In Carter, R.W.G., and Woodroffe, C. (eds.), Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics. Cambridge University Press, 477-509.

Petrić, I. (2000): Gospodarstvo općine Dugi Rat, U: Općina Dugi Rat, Poglavarstvo općine Dugi Rat, Dugi Rat, 7-14.

Pikelj, K.; Dragnić, V., & Malovrazic, N. (2013): Eastern Adriatic. Pranzini, E. i Williams, A.T. Coastal Erosion and Protection in Europe. Oxford, UK: 333-336.

Pikelj, K., Ilić, S., James, M.R., Kordić, B. (2015): Application of SfM photogrammetry for morphological changes on gravel beaches: Dugi Rat case study (Croatia). Coastal and Maritime Mediterranean Conference, Ferrara, Italija, 25-27.11.2015.

Pikelj, K. i Juračić, M. (2013): Eastern Adriatic Coast (EAC): Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast. Journal of Coastal Research, 29, 944-957.

Pikelj, K., Kovačić, M. i Cvetko Tešović, B. (2014): Geological control of beach sediment in the Kaštela-Ploče flysch zone (Adriatic Sea, Croatia). 5th International Symposium Monitoring of Mediterranean coastal areas: problems and measurement techniques - Abstracts, Livorno, Italy, 17-19 June, 2014.

Powers, M.C. (1953): A new roundness scale for sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology 23(2), 117-119.

Rajčić, S.T., Faivre, S. i Buzjak, N. (2010): Promjene žala na području Medića i Mimica od kraja šezdesetih godina 20. stoljeća do danas, Hrvatski geografski glasnik, 72(2), 27-48.

Remondino, F. i El-Hakim, S. (2006): Image-Based 3D Modeling: A Review. The Photogrammetric Record 21(115) 269-291.

Ružić, I., Marović, I., Benac, Č. i Ilić, S. (2014): Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia. Geo-Marine Letters, 34(6), 555-565.

Sallenger, A.H., Jr.; Krabill, W., Brock, J., Swift, R., Jensen, M., Serdar, M., Richmond, B.M., Hampton, M. i Eslinger, D. (1999): Recent el Niño eroded U.S. west coast: A study conducted with the help of an airborne laser found that much of the U.S. west coast was altered due to effects of the 1997-1998 el Niño. *Earth in Space*, 5-9.

Saravanan, S., Chandrasekar, N., Hentry, C. i Joevivek, V. (2014.): Management of coastal erosion using remote sensing and GIS techniques, *SE India*, 5 (4), 211-221.

Schwartz, M.I. (2005): *Encyclopedia of coastal science*. Springer Science & Business Media. The Netherlands, 1213 str.

Shepard, F. P. (1937): Revised classification of marine shorelines, *Journal of Geology* 45, 602-624.

Sime, L. C. i Ferguson R.I. (2003): Information on Grain Size in Gravel-Bed Rivers by Automated Image Analysis. *Journal of Sedimentary Research* 73, 630-636.

Surić, M., Richards, D.A., Hoffmann, D.L., Tibljaš, D. i Juračić, M. (2009): Sea level change during MIS 5a based on submerged speleothems from the eastern Adriatic Sea (Croatia). *Marine Geology*, 262(14), 62-67.

Tišljar, J. (1994): *Sedimentne stijene*, Školska knjiga, Zagreb, 422 str.

Turner, I.L. (2013): Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner (Lidar). *Journal of Coastal Research*, 65, 636-641.

Turner, I.L. Russell, P.E. i Butt, T. (2008): Measurement of wave-by wave bed-levels in the swash zone. *Coastal Engineering* 55, 1237-12.

Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I. i Matičec, D. (2005): Evolution of the Adriatic carbonate platform: palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220 (34), 333-360.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. i Reynolds, J.M.(2012): Structure from Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

Zingg, T. (1935): Beitrage zur Schotteranalyse. Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen 15, 39-140.

Internetski izvori:

- (1) <http://thebritishgeographer.weebly.com/uploads/1/1/8/1/11812015/6876746.jpg?414>
- (2) http://www.icsm.gov.au/mapping/web_images/figure_25v2.jpg
- (3) <http://korfezharita.com/uk/wp-content/uploads/2015/02/erialsurveying-300x244.jpg>
- (4) <http://argus.deltares.nl/media/ArgusBrochure.pdf>
- (5) <http://www.laser-scanning-buildings.co.uk/images/Laser-scan-being-used-for-coastal-monitoring.gif>
- (6) https://www.fs.fed.us/pnw/olympia/silv/lidar/images/figure1_sm.jpg
- (7) <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=20257>
- (8) http://www.seopak.org/wp-content/uploads/1d27b5c_5346633-01-061.jpg